

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Оптимізація конструктивних елементів роторних зернодробарок
для підвищення їх надійності та терміну експлуатації»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-науковою програмою
Сервісна інженерія в
агропромисловому виробництві
назва ОПП
спеціальності 133 Галузеве
машинобудування, 208 Агроінженерія
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти магістр групи 1
Кея Олександр Олександрович

Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти
Керівник: Левченко Ю. В.
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Яхін С.В.
Прізвище та ініціали рецензента

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»

Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,

Станіслав ПОПОВ
16 квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

КЕЯ Олександр

1. Тема роботи: *«Оптимізація конструктивних елементів роторних зернодробарок для підвищення їх надійності та терміну експлуатації»*,

керівник роботи *кандидат техн. наук, доцент ЛЕВЧЕНКО Юлія*,
затверджено засіданням кафедри, протокол № _____ від _____ р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 05 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Теоретичні положення.

Розділ 3. Методика досліджень.

Розділ 4. Результати експериментів.

Розділ 5. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титульний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 16 квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 16.04.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	20.04-26.04.25	
3	Опрацювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	27.04-31.04.25	
5	Виконання розділів роботи	18.05-31.03.25	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	19.04-23.04.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	26.04-04.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	20.05-26.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Олександр КЕЯ
(підпис)

Керівник роботи _____ Юлія ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 5 розділів, ___ рисунків, ___ таблиць, ___ використаних джерел, ___ сторінок.

Мета роботи – підвищення надійності, зносостійкості та ефективності роботи роторної зернодробарки шляхом оптимізації конструктивних елементів, режимів експлуатації та впровадження сучасних сервісно-інженерних рішень.

Об'єкт дослідження – процес подрібнення зернових матеріалів у роторних дробарках в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – конструктивні параметри та експлуатаційні характеристики роторної зернодробарки, що впливають на інтенсивність зношування, якість подрібнення, енерговитрати та довговічність обладнання.

Практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні технічних рішень, спрямованих на підвищення ресурсу робочих органів роторної дробарки, зменшення інтенсивності їх зношування, покращення якості подрібнення зернових матеріалів та зниження експлуатаційних витрат. Запропоновані конструктивні й сервісно-інженерні рішення можуть бути використані під час модернізації подрібнювального обладнання агропромислових підприємств.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану подрібнювального обладнання та досліджень у галузі роторних дробарок. Розглянуто класифікацію машин для подрібнення зернопродуктів, особливості їх конструкції та основні фактори, що впливають на ефективність і довговічність роботи. Встановлено, що найбільш інтенсивного зношування зазнають робочі поверхні ротора та протиріза, а основними причинами зниження надійності є абразивний вплив мінеральних домішок, підвищені динамічні навантаження та порушення робочого зазору між елементами дробарки.

У другому розділі наведено теоретичні положення процесу подрібнення зерна та виконано аналіз динаміки роботи ротора роторної дробарки. Досліджено вплив конструктивних параметрів рифлів, величини робочого зазору та режимів роботи на характер руйнування зерна і інтенсивність зношування робочих поверхонь. Обґрунтовано доцільність використання раціональної геометрії рифлів та

оптимального розташування протиріза для забезпечення стабільного процесу подрібнення.

У третьому розділі розроблено методика проведення експериментальних досліджень. Описано лабораторне обладнання, вимірювальні прилади та методи визначення фізико-механічних характеристик зернових матеріалів, граничного напруження зрізу зернин, гранулометричного складу продукту та рівня зношування робочих органів дробарки. Наведено програму експериментів і методика статистичної обробки результатів.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень та аналіз впливу конструктивних і технологічних параметрів на ефективність процесу подрібнення. Встановлено закономірності зміни якості подрібнення, енерговитрат та інтенсивності зношування залежно від величини робочого зазору, швидкості ротора та концентрації мінеральних домішок у зерновій масі. Досліджено вплив різних матеріалів і способів зміцнення робочих поверхонь на ресурс протиріза та ротора. Обґрунтовано використання загартованої сталі 45 і технологій фінішно-плазмового зміцнення для підвищення зносостійкості робочих органів.

У п'ятому розділі виконано практичну реалізацію розробок та запропоновано комплекс сервісно-інженерних рішень щодо підвищення надійності роторної дробарки. Розроблено регламент технічного обслуговування, систему контролю технічного стану та рекомендації щодо використання методів вібраційної діагностики і моніторингу параметрів роботи обладнання в режимі реального часу. Проведено оцінку екологічності виробництва та визначено заходи зі зниження пиловиділення, шуму, вібрацій і енергоспоживання.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: результати можуть бути використані при модернізації та проектуванні роторних зернодробарок, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти аграрного й технічного профілю.

Сфера застосування результатів роботи – підприємства агропромислового комплексу, комбикормові заводи, зернопереробні та тваринницькі підприємства.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою сервісу Strike Plagiarism та є оригінальним – 99 %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню надійності, зносостійкості та ефективності роботи роторної зернодробарки шляхом удосконалення конструктивних елементів, оптимізації режимів подрібнення та впровадження сучасних сервісно-інженерних рішень. У роботі проаналізовано сучасний стан подрібнювального обладнання, досліджено вплив конструктивних параметрів ротора та протиріза на процес подрібнення зернових матеріалів і інтенсивність зношування робочих поверхонь. Запропоновано технічні рішення щодо підвищення ресурсу робочих органів, покращення якості подрібнення та зниження експлуатаційних витрат.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РОТОРНА ДРОБАРКА, ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА, ПРОТИРІЗ, ЗНОШУВАННЯ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, РОБОЧИЙ ЗАЗОР, РИФЛІ, ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ПЛАЗМОВЕ ЗМІЦНЕННЯ.

ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to improving the reliability, wear resistance, and efficiency of a rotary grain crusher by optimizing its structural elements, grinding modes, and implementing modern service-engineering solutions. The study analyzes the current state of grain crushing equipment and investigates the influence of rotor and counter-cutting element parameters on the grain grinding process and wear intensity of working surfaces. Technical solutions aimed at increasing the service life of working elements, improving grinding quality, and reducing operating costs are proposed.

KEYWORDS: ROTARY CRUSHER, GRAIN GRINDING, COUNTER-CUTTING ELEMENT, WEAR, WEAR RESISTANCE, WORKING CLEARANCE, RIBBED SURFACES, VIBRATION DIAGNOSTICS, MAINTENANCE, PLASMA HARDENING.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Сучасний стан та проблеми експлуатації дробарок	9
1.2. Класифікація та особливості конструкції машин для подрібнення зернопродуктів	11
1.3. Конструктивні особливості роторних дробарок	11
1.4. Аналіз основних вузлів, що визначають надійність експлуатації дробарки	16
1.5. Сучасні підходи до підвищення надійності та аналіз сервісно-інженерних рішень	25
Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ	42
2.1. Теоретичні основи процесу подрібнення зерна	42
2.2. Динаміка роботи ротора	45
2.3. Розрахунок навантажень на робочі органи	48
2.4. Теоретичні основи надійності машин	51
Висновки до розділу 2	51
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	57
3.1. Програма та об'єкт досліджень	57
3.2. Методика проведення експериментів	59
3.3 Методика визначення зносу та надійності роторної дробарки	68
3.4 Математичне моделювання роботи дробарки	76
Висновки до розділу 3	79
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	81
4.1. Аналіз отриманих даних	81
4.2 Вплив режимів роботи на надійність	89
4.3 Оцінка довговічності елементів	92
Висновки до розділу 4	101
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ	103
5.1. Сервісно-інженерні рішення	103
5.2. Економічна ефективність	109
5.3 Екологічність виробництва та зниження негативного впливу роторної дробарки на навколишнє середовище	114
5.4. Охорона праці та безпека	116
Висновки до розділу 5	119
ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	94

ВСТУП

Агропромисловий комплекс України відіграє стратегічну роль у формуванні економічного потенціалу держави, а рівень його розвитку безпосередньо залежить від ефективності технічних засобів, що використовуються у процесах переробки зернової сировини. У сучасних умовах зростання обсягів виробництва та експорту зерна особливого значення набуває підвищення продуктивності та надійності обладнання, зокрема машин для подрібнення, які є невід'ємною складовою технологічних ліній кормовиробництва та зернопереробки.

Роторні зернодробарки є одними з найбільш поширених видів обладнання, що забезпечують подрібнення зерна до необхідної фракції. Ефективність їх роботи значною мірою залежить від конструктивних особливостей основних вузлів, таких як ротор, робочі органи, камера дроблення та система кріплення елементів. Водночас у процесі експлуатації ці машини піддаються значним динамічним та ударним навантаженням, що призводить до інтенсивного зносу деталей, виникнення вібрацій, дисбалансу та, як наслідок, зниження надійності й скорочення терміну служби обладнання.

Аналіз сучасного стану технічного забезпечення показує, що значна частина зернодробарок, які використовуються на підприємствах, має конструктивні недоліки або експлуатується в умовах, що не забезпечують оптимальних режимів роботи. Недостатня увага до питань підвищення надійності, використання застарілих матеріалів та відсутність ефективних сервісно-інженерних рішень призводять до збільшення витрат на ремонт і обслуговування, зниження продуктивності та підвищення енерговитрат.

У зв'язку з цим актуальним є пошук інженерних рішень, спрямованих на оптимізацію конструктивних елементів роторних зернодробарок, що дозволить зменшити інтенсивність зносу, підвищити стійкість до динамічних навантажень, покращити умови роботи вузлів і, як наслідок, збільшити термін експлуатації обладнання. Особливого значення набуває вдосконалення геометрії робочих

органів, балансування ротора, вибір матеріалів з підвищеною зносостійкістю та впровадження сучасних підходів до технічного обслуговування і діагностики.

Зростання обсягів виробництва комбікормів і підвищені вимоги до ефективності та надійності технологічного обладнання обумовлюють необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення конструкції роторних зернодробарок. Це визначає актуальність даної магістерської роботи та її практичну значущість для підприємств агропромислового комплексу.

Мета дослідження – підвищення надійності та збільшення терміну експлуатації роторної зернодробарки шляхом оптимізації її конструктивних елементів і умов роботи основних вузлів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій роторних зернодробарок та визначити їх основні недоліки.

- дослідити вплив конструктивних параметрів робочих органів і ротора на процес подрібнення та знос деталей.

- обґрунтувати напрями оптимізації конструкції з урахуванням умов експлуатації.

- розробити удосконалені конструктивні рішення для підвищення надійності вузлів дробарки.

- виконати розрахунок навантажень, що діють на основні елементи конструкції.

- провести аналіз впливу запропонованих змін на довговічність і ефективність роботи обладнання.

- оцінити техніко-економічну ефективність впровадження удосконалених рішень.

Об'єкт дослідження – процес подрібнення зернових матеріалів у роторних зернодробарках в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – конструктивні параметри та експлуатаційні характеристики роторної зернодробарки, що впливають на її надійність, зносостійкість і термін служби.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасний стан та проблеми експлуатації дробарок

У структурі аграрного сектору України вагоме місце посідають малі аграрні господарства, частка яких становить близько 25% від загальної кількості. Реалізація потенційних можливостей і конкурентних переваг України потребує скорочення технологічного відставання та підвищення інвестиційної привабливості переробної галузі. Такий підхід сприятиме розвитку як енергетичного, так і технологічного секторів не лише в межах держави, а й за її межами [2, 3].

Вдосконалення подрібнювальних машин супроводжується рядом складнощів, серед яких підвищене енергоспоживання, значні витрати дефіцитних матеріалів для виготовлення обладнання, а також перевитрати зернової сировини під час обробки. Одночасно з цим зростають вимоги до якості подрібнення: важливими критеріями залишаються однорідність гранулометричного складу та відсутність небажаних фракцій. Саме ці показники характеризують ефективність робочого процесу подрібнення. Проте існуючі традиційні конструкції машин у більшості випадків не забезпечують подальшого підвищення їх надійності та продуктивності [4, 5].

Процес подрібнення зерна передбачає зниження розмірів частинок до встановлених значень за рахунок механічного впливу, який реалізується шляхом дроблення, помелу, плющення або інших методів. Необхідність такої обробки зумовлена особливостями травної системи тварин і спрямована на більш повне засвоєння поживних компонентів, що досягається, зокрема, руйнуванням крохмальних структур і трансформацією білкових властивостей. У раціонах великої рогатої худоби частка концентрованих кормів може становити до 60%, тоді як у харчуванні свиней і птиці вона здатна досягати 95% [6, 7].

У процесі механічного руйнування зернової сировини формується значна кількість дрібнодисперсного пилу, при цьому у складі кінцевого продукту можуть залишатися неушкоджені зерна, що не відповідають встановленим зоотехнічним вимогам і необхідному ступеню подрібнення, порушуючи однорідність гранулометричного складу. Частинки великого розміру, як правило, повертаються на повторне подрібнення. Водночас надмірно дрібні фракції, через свої властивості, здатні посилювати інтенсивність зношування робочих поверхонь у присутності абразивного середовища та знижувати ефективність технологічного процесу за відсутності належного очищення [9, 10].

Стан контактних поверхонь безпосередньо визначає надійність і довговічність обладнання, яке функціонує в різних експлуатаційних умовах. Для подрібнювальних машин характерним є абразивний знос, що супроводжується значною швидкістю руйнування матеріалу деталей. Підвищення ресурсу роботи елементів дробильного обладнання можливе лише за умови детального вивчення механізмів їх зношування в абразивному середовищі [24, 56, 72]. Більшість подрібнювальної техніки, що використовується на підприємствах, є морально застарілою та характеризується значним рівнем зношеності, тоді як її заміна потребує суттєвих фінансових вкладень і часто пов'язана з модернізацією всієї технологічної системи, що є складним завданням для багатьох господарств. У зв'язку з цим актуальним є пошук нових матеріалів і технічних рішень, які поєднують високу зносостійкість із економічною ефективністю та дозволяють збільшити строк служби деталей. Таким чином, проблема підвищення зносостійкості робочих органів подрібнювальних машин залишається важливим науковим напрямом, що потребує подальших теоретичних і експериментальних досліджень [56, 62, 72].

1.2. Класифікація та особливості конструкції машин для подрібнення зернопродуктів

Поділ вихідної сировини на окремі частини в процесі подрібнення здійснюється різними способами механічного впливу, які визначають рівномірність гранулометричного складу, якість кінцевого продукту та інтенсивність зношування робочих органів. Усі ці методи ґрунтуються на дії двох основних видів напружень – нормальних і дотичних, однак відрізняються способом їх прикладання та конструктивними особливостями елементів, що взаємодіють із матеріалом. Вибір оптимального способу подрібнення визначається фізико-механічними властивостями оброблюваної сировини [12].

Поділ матеріалів на окремі фрагменти за допомогою робочих органів подрібнювальних машин здійснюється відповідно до схем, наведених на рисунку 1.1, а також їх різних поєднань [13].

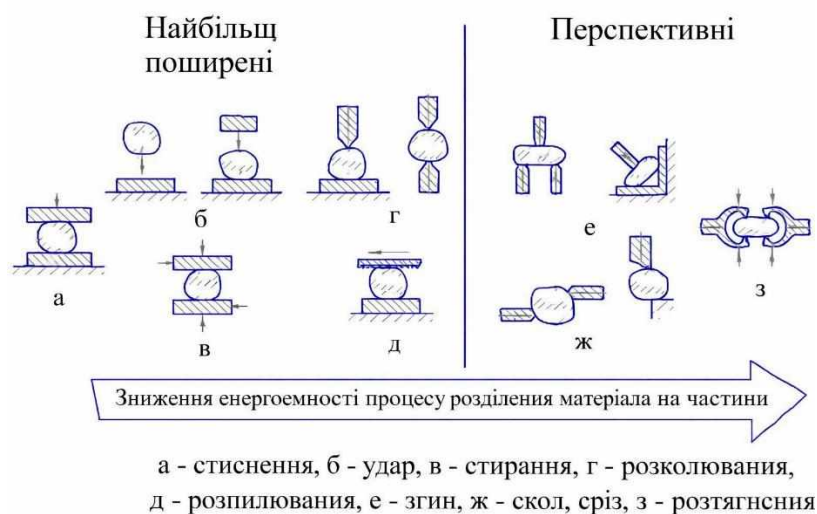


Рисунок 1.1 – Способи впливу на матеріал під час подрібнення

Сучасні подрібнювальні установки забезпечують підвищення однорідності сумішей, сприяють інтенсифікації перебігу хімічних реакцій і загалом покращують ефективність технологічних процесів [6, 7].

Результативність роботи подрібнювального обладнання характеризується такими показниками, як продуктивність, питомі витрати енергії та матеріалів, а також якість кінцевого продукту. Основні різновиди подрібнювачів, які застосовуються для здійснення грубого та середнього подрібнення сировини,

зображені на рисунку 1.2.

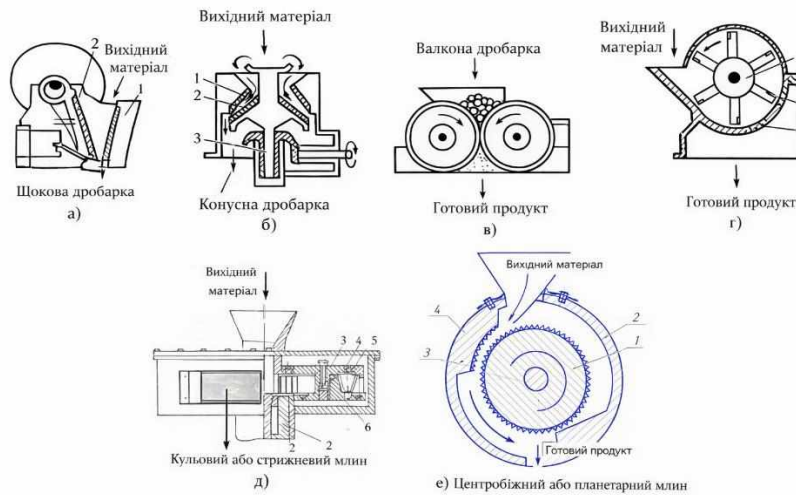


Рисунок 1.2 – Види дробарок: а – шокова (1, 2 – щоки); б – конусна (1, 2 – робочі конуси, 3 – приводний вал); в – вальцьова; г – молоткова (1 – вал з молотками, 2 – статор, 3 – решето), д – відцентрово-роторна (1,2 – внутрішній і зовнішній вал; 3,4 – ріжучі елементи; 5,6 – верхній і нижній диск-ротор), е – роторна (1 – ротор, 2 – статор, 3,4 ріжучі поверхні (рифлені) ротора і статора).

Шокова дробарка широко використовується для руйнування різноманітних матеріалів, однак її ефективність знижується при обробці в'язкопружних речовин. Механізм її роботи базується на стисканні вихідної сировини між робочими елементами – щоками, унаслідок чого виникають напруження стиску та зсуву, що призводять до руйнування матеріалу [13].

Конусні дробарки здебільшого застосовують для середнього та дрібного ступеня подрібнення. Основною сферою їх використання є переробка руд і різноманітних корисних копалин. Руйнування матеріалу в таких агрегатах відбувається внаслідок поєднання процесів стирання та розколювання [14].

Вальцеві дробарки конструктивно складаються з двох горизонтально розташованих рифлених валків, що обертаються назустріч один одному. У зоні контакту між ними вихідна сировина піддається стисканню, роздавлюванню та стиранню, що забезпечує її руйнування. Серед недоліків таких машин відзначають

підвищені вимоги до точності виготовлення, значну вартість придбання і обслуговування, а також налипання матеріалу при його вологості понад 18%. Крім того, вальцьові дробарки характеризуються відносно невисокою питомою продуктивністю порівняно з іншими типами обладнання [12, 13].

Молоткові дробарки відзначаються універсальністю та здатністю обробляти широкий спектр матеріалів, здійснюючи їх руйнування ударами молотків, закріплених на приводному валу. Важливою складовою їх конструкції є наявність сепараторів і калібрувальних елементів (решета, сита тощо). До основних недоліків належать неефективна робота з вологими та жирними матеріалами, підвищена металоємність, а також нерівномірність гранулометричного складу кінцевого продукту, що значною мірою зумовлено зношуванням робочих частин [6, 7, 9, 11].

Дискові дробарки мають у своїй конструкції один або два обертові вали з закріпленими на них ріжучими дисками, які зазвичай оснащені зубчастою поверхнею для покращення взаємодії. Подрібнення матеріалу в них здійснюється за рахунок сколювання та стирання. Для запобігання пошкодженням валів між дисками встановлюють розпірні кільця. За необхідності система може доповнюватися ще однією парою дисків, що дозволяє реалізувати двоступеневе подрібнення, а також сепараторами для регулювання крупності готового продукту [32].

Відцентрово-роторні дробарки, як правило, мають вертикальне розташування вала. Переміщення матеріалу в них подібне до процесів у роторних машинах, однак вертикальна схема дозволяє реалізувати ефект самофутерування, коли матеріал частково захищає робочі поверхні. Це забезпечує можливість ефективної роботи в абразивних середовищах. Поряд із високою продуктивністю та відносною простотою конструкції, характерними для роторних агрегатів, такі машини відзначаються підвищеною швидкістю обертання ротора, що сприяє інтенсифікації процесу подрібнення та прискореному отриманню готового продукту [7, 12, 14].

Роторні дробарки призначені для обробки матеріалів середньої твердості та функціонують за принципом високошвидкісного обертання ротора. Їх відмінною

особливістю, порівняно з дисковими і відцентрово-роторними установками, є горизонтальне розташування ротора, а від молоткових – відсутність молотків, оскільки руйнування здійснюється за рахунок взаємодії рифлених поверхонь ротора і статора [6, 12].

Млини здійснюють подрібнення матеріалу шляхом комплексного впливу різних механічних факторів, серед яких удар, стирання, стискання та інші. У зернопереробній галузі вони переважно використовуються в борошномельній промисловості. Для виробництва комбікормів їх застосування обмежене через утворення надмірно дрібнодисперсної борошнистої фракції, яка не відповідає зоотехнічним вимогам і може бути використана лише для подальшого гранулювання [4, 14].

Основні типи подрібнювачів (млинів), призначених для тонкого помелу, наведені на рисунку 1.3.

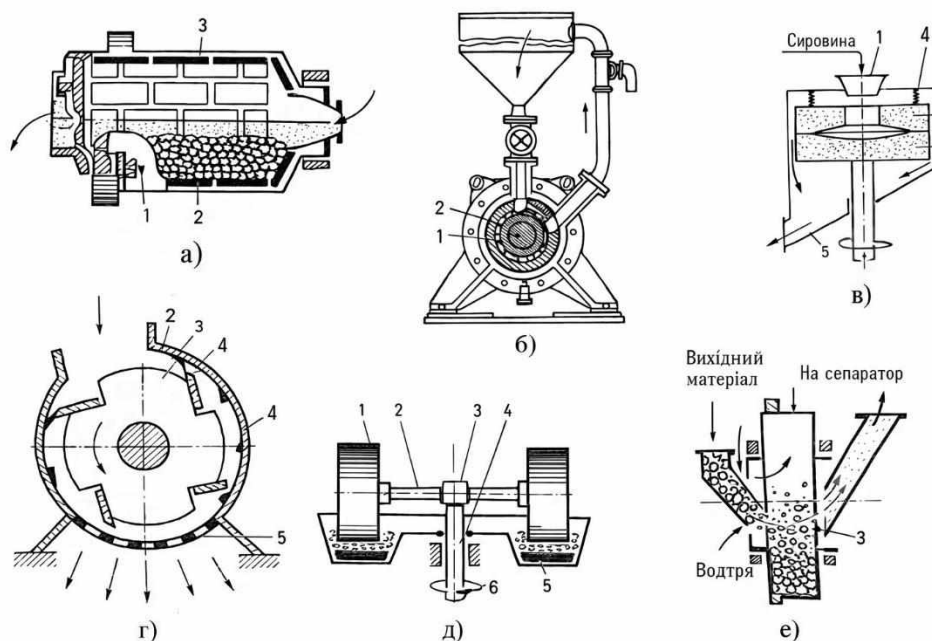


Рисунок 1.3 – Типи млинів: а – барабанно-кульовий (1 – корпус-статор, 2 – подрібнювальні тіла, 3 – футерування, 4 – привідна шестерня); б – кавітаційний (1 – ротор, 2 – корпус-статор); в – жорновий млин (1 – зона завантаження матеріалу, 2 – притискні елементи, 3, 4 – жорна з каменю або іншого матеріалу, 5 – зона вивантаження продукту); г – ножовий млин (1 – корпус із внутрішніми ножами 4,

2 – ротор з ножами 3, 5 – калібрувальне решето); д – млин з бігунами (1 – каток з напіввіссю 2, 3 – водило, 4 – вал, 5 – чаша з матеріалом, що подрібнюється, 6 – приводний вал); е – безкульовий барабанний млин (1 – корпус-статор, 2 – привідна шестерня, 3 – випускна діафрагма)

Плющильні машини призначені для отримання плющеного зерна, яке переважно використовується у раціонах жуйних тварин (коні, воли, ВРХ). Водночас досвід вітчизняного та світового тваринництва показує, що навіть при годівлі ВРХ доцільно поєднувати таку сировину з дробленими концентрованими кормами. Додатковим недоліком є зниження однорідності сумішей при змішуванні плющених компонентів з іншими інгредієнтами комбікорму, яка зазвичай не перевищує 90% [3, 6].

Найбільш розповсюдженим видом обладнання для подрібнення фуражного зерна залишаються молоткові дробарки. Вони відзначаються простотою конструкції, зручністю експлуатації та технічного обслуговування, а також достатньо добре дослідженим робочим процесом. В сучасних умовах триває вдосконалення конструкцій молоткових дробарок, однак спостерігається тенденція до їх поступового витіснення більш ефективними типами обладнання, зокрема дезінтеграторами, ударно-відцентровими, відцентрово-роторними, дисковими та роторними агрегатами. Такі установки забезпечують співставну або вищу продуктивність при менших витратах енергії та матеріалів і формують більш якісний кінцевий продукт [7, 10].

У галузі постійно проводяться дослідження, спрямовані на створення нових і вдосконалення існуючих конструкцій подрібнювального обладнання [7, 8, 10]. Прикладом є горизонтальна роторна дробарка, розроблена науковою школою А.Т. Лебедева, у якій процес подрібнення реалізується завдяки взаємодії рифлених поверхонь ротора та статора, що дозволяє досягати однорідності гранулометричного складу продукту на рівні до 95% [6, 7, 9].

Різні види обладнання для подрібнення кормів (дробарки, млини, плющилки) поділяють на безрешітні (рисунок 1.4, а), решітні та універсальні

(рисунок 1.4, б і в). При цьому ускладнення конструкції за рахунок збільшення кількості стадій подрібнення в межах одного агрегату спричиняє підвищення вартості технологічного процесу [32, 80].



Рисунок 1.4 - Схеми типових подрібнювачів

На рисунку 1.4 показано послідовність стадій подрібнення вихідного матеріалу, яка формує конструктивно-технологічну схему конкретної машини. Для досягнення необхідної крупності продукту використовують додаткові елементи, зокрема декілька подрібнювальних камер (дві і більше), оснащених пристроями для сепарації [8, 9].

Підбір обладнання для подрібнення здійснюється з урахуванням сукупності показників, серед яких оцінюються конструктивні особливості, продуктивність, рівень енерго- та матеріаломісткості, якість кінцевого продукту, зносостійкість робочих поверхонь, а також інші фактори, що визначають надійність і ефективність функціонування як окремих вузлів, так і машини загалом.

1.3. Конструктивні особливості роторних дробарок

Переважає більшість досліджень в галузі обладнання для подрібнення зосереджена на аналізі зносостійкості робочих органів дробарок. Це пов'язано з відносно недавнім впровадженням обладнання, що працює за принципами

сколювання та зрізу. Такий підхід дає змогу зменшити кількість впливів, необхідних для руйнування зерна, що, у свою чергу, знижує енерговитрати процесу. Водночас головною перевагою є отримання продукту з більш однорідним гранулометричним складом і мінімальним вмістом пилоподібних фракцій. Серед подрібнювачів цього типу найвищою ефективністю відзначаються роторні та відцентрово-роторні дробарки [18].

Разом з тим результативність таких конструкцій значною мірою визначається геометрією робочих поверхонь, що контактують із матеріалом, і суттєво залежить від ступеня їх зношування. Досягнення високої якості продукту (вміст пилоподібної фракції до 10% при рівні однорідності гранулометричного складу до 90%) забезпечують вальцьові дробарки з рифленими валками, поверхня яких може мати різну конфігурацію нарізки. Проте наявність ряду раніше зазначених недоліків обмежує їх широке застосування у виробництві [19].

Порівняно з вальцевими дробарками, горизонтальні роторні дробарки відзначаються спрощеною конструкцією, водночас забезпечуючи можливість точного регулювання робочих параметрів і налаштування конструктивних характеристик. Це обумовлено наявністю лише одного рухомого вузла - ротора - та зосередженням зони руйнування матеріалу в місці взаємодії пари ротор-протиріз під час обробки зернової сировини [20].

Для визначення найбільш ефективних напрямів підвищення зносостійкості роторних дробарок доцільно звернутися до результатів досліджень зношування робочих елементів у молоткових і вальцьових подрібнювачах. Завдяки широкому застосуванню цих машин у технологічних процесах харчової та кормової промисловості накопичено значний обсяг практичного досвіду щодо оцінки їх зносостійкості [18].

За умови якісного попереднього очищення зернової сировини, що подається у робочу зону дробарки, основним механізмом зношування стає абразивний вплив, спричинений мінеральними домішками, присутніми у загальній масі фуражного зерна.

Найбільш інтенсивному зношуванню піддаються вальці, робочі поверхні

яких зазнають нерівномірного руйнування при обробці твердих і абразивних матеріалів. Їх відновлення здійснюється на спеціалізованому обладнанні шляхом повторного нарізання рифлів. Після виконання ремонтних робіт проводиться перевірка геометричної точності (циліндричності), а під час монтажу контролюються параметри встановлення, зокрема висота та пружність пружин. Додатково перевіряють паралельність валків, величину зазорів між ними, температурний режим підшипників, наявність вібрацій, а також функціонування пружинних і регулювальних механізмів [2, 16].

Виконання технічного обслуговування та ремонтних операцій є складним і трудомістким процесом, що потребує застосування спеціалізованого обладнання і кваліфікованого персоналу. Навіть незначні відхилення від заданих технологічних зазорів або конструктивних параметрів під час обробки валків можуть призвести до погіршення роботи дробарки або її повної відмови [7].

Найбільш поширеним типом обладнання для подрібнення зернових матеріалів, незалежно від масштабів господарства, залишаються молоткові дробарки. Водночас експлуатаційний досвід свідчить про наявність суттєвих недоліків, зокрема інтенсивного зношування робочих елементів і зниження якості подрібнення, особливо при підвищеній вологості зерна.

Практичні спостереження показують, що найменший ресурс у молоткових дробарках мають молотки, тривалість служби яких становить від 72 до 300 годин. Інші робочі елементи функціонують приблизно вдвічі довше. Така ситуація зумовлює необхідність проведення до 50 технічних обслуговувань обладнання протягом року. Раціональне використання молотків передбачає їх експлуатацію до досягнення граничного стану, тому точне прогнозування ресурсу є важливим фактором підвищення надійності технологічного процесу [16].

Унаслідок цього перелічені недоліки нерідко переважають переваги молоткових дробарок, серед яких універсальність, широкий діапазон подрібнення та незначний нагрів продукту. Недостатня розробленість теоретичних положень, незважаючи на тривалі дослідження, призводить до того, що навіть незначні зміни геометрії молотка, як початкової, так і в процесі експлуатації, викликають

виникнення складно прогнозованих факторів, які негативно впливають на ефективність роботи обладнання та довговічність його робочих елементів [61].

Дослідження жорстко закріплених молотків, виконані науковцями НУБІП, засвідчили, що інтенсивність питомого зношування цих елементів визначається як характеристиками оброблюваного матеріалу, так і властивостями матеріалу, з якого виготовлено сам молоток [6].

У роботах інших вчених запропоновано зміцнення робочої кромки молотка з метою зменшення передчасного зношування та запобігання порушенню стабільності обертання ротора. Водночас питання щодо оптимальної глибини зміцнення та необхідного рівня твердості обробленої поверхні залишилися недослідженими [15].

Показовим у цьому контексті є експеримент, проведений у сільськогосподарському підприємстві «Перемога+» на Полтавщині. На молотковій дробарці ДМ-10 було встановлено нові молотки та решето для отримання комбікорму з великим модулем помелу. Протягом 35 днів експлуатації здійснювався щотижневий відбір проб масою по 5 кг, при цьому щотижневий обсяг подрібнення становив близько 300 т. Визначення модуля помелу проводилося відповідно до нормативних вимог [31, 62].

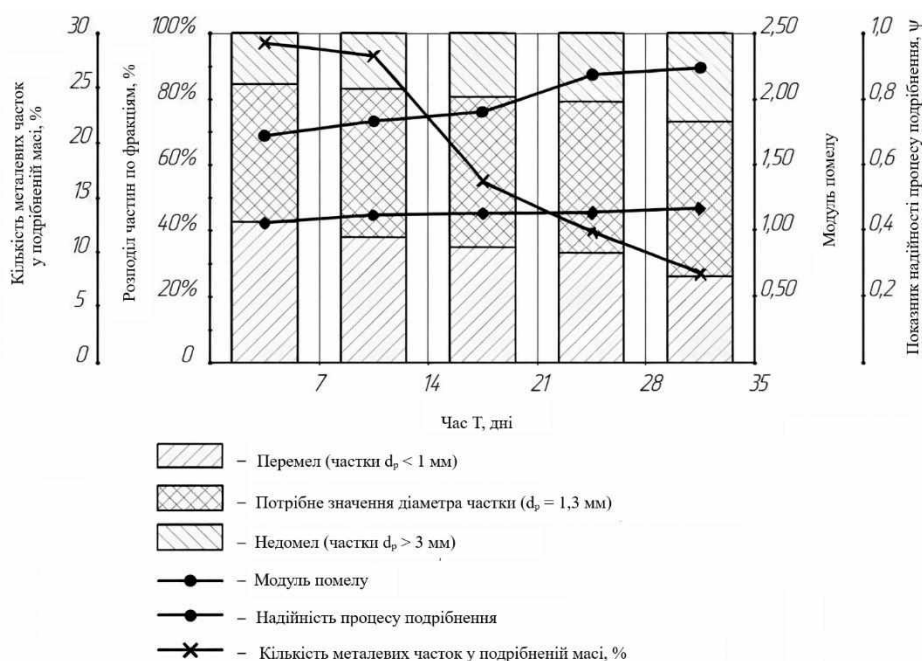


Рисунок 1.5 – Експериментально встановлені показники помелу дробарки

ДМ-10

Як показано на графіку рисунка 1.5, у початковий період роботи середній розмір частинок дорівнював 1,72 мм при $M = 1,8...2,6$ мм, що свідчить про підвищений вміст дрібнодисперсних фракцій у продукті. З часом спостерігалось поступове збільшення середнього розміру частинок. На початковому етапі експлуатації частка переподрібненої фракції становила 42,4%, а недомелу – 15,2%, тоді як наприкінці ці показники досягали відповідно 26,2% і 26,8%. Такі зміни пояснюються зношуванням молотків, маса яких зменшилася в середньому на 4,5 кг від початкових 24,7 кг, а також зносом решета. За весь період експерименту частка продукту, що відповідає заданому модулю помелу, не перевищувала 47%. Незважаючи на відповідність середнього розміру частинок встановленому діапазону, фактично лише близько половини кормової суміші відповідає зоотехнічним вимогам [18].

Таким чином, зі зношуванням робочих елементів дробарки змінюється і ступінь подрібнення вихідної сировини. Проте у більшості теоретичних розробок, спрямованих на підвищення ефективності подрібнювального обладнання, цей чинник або не враховується, або розглядається лише в межах окремих експериментальних досліджень. Крім того, дедалі частіше піднімається питання доцільності подальшого використання та виробництва молоткових дробарок, а також їх заміни більш сучасними конструктивними рішеннями, що забезпечують кращі питомі показники при збереженні високої якості подрібнення.

Розроблення нових і вдосконалення існуючих конструкцій дробарок з метою забезпечення тварин якісними кормами набуває особливої актуальності в умовах постійного зростання вартості продовольчої сировини [1, 14, 24].

Застосування роторних дробарок для подрібнення зернофуражу наразі обмежене, що зумовлено недостатньою вивченістю процесів, які відбуваються під час їх функціонування, зокрема процесів зношування робочих органів [32].

Так, наприклад, у роботі [13] перегляд конструкції роторної дробарки з урахуванням попередньо досліджених рішень, дозволив сформулювати вдосконалену

конструктивно-технологічну схему на основі розробок. У дослідженні доведено ефективність використання горизонтальних роторних дробарок при подрібненні кормового зерна, а також встановлено, що запропоновані конструкції забезпечують зниження вмісту пилоподібних фракцій у готовому продукті до 5%. Водночас питання зношування ключових робочих поверхонь, їх цілісності та довговічності, які безпосередньо впливають на надійність і ефективність процесу подрібнення, залишилися поза межами дослідження.

При цьому в за кінематичними ознаками роторна дробарка має подібність до молоткової, однак процес розділення зернин на частини в ній відбувається під час кожного контакту з робочими елементами. Конструктивні особливості роторної машини дають змогу реалізувати енергоощадний спосіб руйнування матеріалу шляхом зрізу (сколювання), аналогічний принципу, що застосовується у вальцьових дробарках [22, 32].

Запропонована у дослідженні [32] технологічна схема подрібнення зерна, що включає етапи заклинювання, впливу та виведення, забезпечує високі показники ефективності процесу. Проте для впровадження в умовах фермерських господарств необхідно додатково дослідити питання ресурсу роботи робочих органів роторних дробарок до досягнення граничного рівня їх зношування.

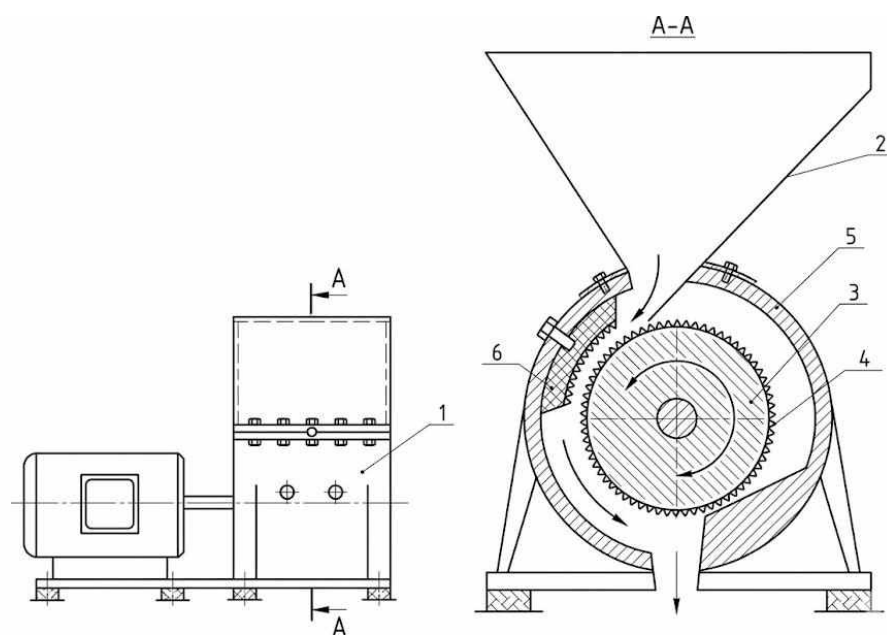


Рисунок 1.6 - Схема роторної дробарки

У роторній дробарці 1 (рисунок 1.6) руйнування матеріалу здійснюється під дією дотичних напружень зсуву за механізмом «сколювання-зріз». Зерно з бункера завантаження 2 через відповідний отвір надходить у дробильну камеру, де потрапляє у пази (рифлі) 4 ротора 3. Далі матеріал переміщується до ріжучих елементів - протириза з рифлями 6, розміщеного на статорі 5, де й відбувається поділ зернин. Простір між ротором і статором заповнюється як початковою сировиною, так і вже подрібненими частинками. У результаті частинки, отримані внаслідок одного або кількох зрізів, виводяться через розвантажувальний отвір [32].

Величина робочого зазору між рифлями визначає характер процесу руйнування, сприяючи виникненню вигинальних навантажень, при цьому саме в цій зоні спостерігається максимальний тиск на робочі поверхні [36,42].

Кінцевий результат подрібнення залежить від положення зернин у момент руйнування, величини робочого зазору, форми, кількості та геометричних параметрів рифлів ротора і статора, фізико-механічних властивостей зерна, коефіцієнта заповнення робочої зони, а також заданого модуля помелу [14, 16].

Обґрунтовано конструкцію компактної роторної дробарки з горизонтальним розташуванням ротора та визначено основні конструктивні і робочі параметри:

- діаметр ротора повинен становити не менше $D = 0,1$ м;
- параметри нарізки рифлів (крок t , висота h і кількість n_p) ротора і статора повинні відповідати властивостям оброблюваного матеріалу при заданому модулі помелу, наприклад застосування однієї рифлі (протириза) на статорі для середнього і грубого помелу тощо [12].

Спираючись на попередні дослідження раціональних режимів подрібнення зернових матеріалів у роторній дробарці, необхідно оцінити вплив факторів, пов'язаних із зношуванням робочих поверхонь за заданих умов експлуатації. Йдеться, зокрема, про режими роботи при лінійних швидкостях 4,5...6,5 м/с, величині робочого зазору в межах 0...0,8 мм та різних значеннях модуля помелу.

За умов середнього ступеня подрібнення зернових культур (пшениця,

ячмінь, овес, кукурудза) рівень вирівняності гранулометричного складу досягав 91...98%, що відповідає значенням фактичної ефективності процесу $\Phi_{\text{еп}} = 9,2...61,5$.

У дослідженнях [14, 22] процес розділення зернин у дробарці розглядався в зоні максимального зближення робочих поверхонь ротора та статора, зокрема вздовж горизонтальної осі ротора. У зв'язку з цим доцільним є розгляд можливості зміщення зони подрібнення в робочій камері ближче до ділянки виведення продукту, що дозволить зменшити вплив інерційних сил, які порушують рівномірність руху матеріалу від завантажувального вузла до зони зрізу.

У роботі [14] також наведено формулу для визначення продуктивності горизонтальної роторної дробарки, яка враховує ступінь подрібнення та коефіцієнт заповнення робочого простору, однак не враховує зношування робочих поверхонь:

$$Q = l \cdot \frac{D_{\text{ч}}}{\lambda} \cdot v_{\text{р}} \cdot \rho \cdot n_{\text{п}} \cdot k_{\text{з}}, \quad (1.8)$$

де l - довжина ротора, м; $D_{\text{ч}}$ - вихідний розмір частинки, наприклад $D_{\text{с}}$, м; $v_{\text{р}}$ - лінійна швидкість у зоні зрізу, м/с; ρ - щільність зернового матеріалу, кг/м³; $n_{\text{п}}$ - пази на роторі, шт.; $k_{\text{з}}$ - коефіцієнт заповнення порожнини подрібнення.

Значення коефіцієнта заповнення потребує додаткового обґрунтування, оскільки його величина становить близько $k_{\text{з}} = 0,06...0,1$, що є нижчим порівняно з аналогічним показником $k_{\text{з}} = 0,2$ для вальцьових верстатів, прийнятих за основу при формуванні конструктивно-технологічної схеми.

Проведений у розділі аналіз показав, що у робочій камері роторної дробарки домінує абразивний механізм зношування. Як абразивні частинки виступають не лише мінеральні домішки, але й найдрібніші фракції самого подрібнюваного матеріалу [9].

Абразивний знос чинить негативний вплив на металеві робочі поверхні, спричиняючи поступове руйнування їх поверхневого шару. Особливість цього процесу полягає в тому, що у кожен окремий момент часу руйнується лише

незначна частина поверхні, незважаючи на велику кількість контактів із абразивними частинками. Формування абразиву в робочій порожнині роторної дробарки зумовлене переважно наявністю мінеральних домішок у зерновій масі. Дослідження причин і наслідків інтенсивності. Вивчення процесів зношування робочих поверхонь під дією цих частинок дає змогу підвищити їх довговічність і розробити заходи для часткового або повного усунення негативного впливу [11, 15].

Згідно з нормативними вимогами, встановлюються обмеження на вміст сторонніх домішок у кормовій пшениці. До таких домішок належать і мінеральні складові (грудки ґрунту, галька, частинки шлаку, руди). Відповідно до державних стандартів їх частка не повинна перевищувати 1% від загальної маси. Мінеральні включення мають фізико-механічні характеристики, що істотно відрізняються від властивостей зерна, що ускладнює процеси транспортування, зберігання та переробки зернової маси з підвищеним їх вмістом.

Як показують результати ряду досліджень із подрібнення зерна пшениці [12, 32], одним із ключових факторів, що визначають ефективність процесу, є величина робочого зазору в роторній дробарці [8]. Мінеральні домішки, подібно до інших абразивних матеріалів, створюють додаткові навантаження на робочі поверхні, що призводить до порушення встановлених технологічних зазорів і прискореного їх зношування [14, 30].

До ефективних напрямів підвищення зносостійкості робочих поверхонь роторної дробарки належать: оптимізація геометричних параметрів (товщина, форма тощо); вибір раціональної кількості робочих елементів, їх швидкісних режимів і частоти взаємодії з матеріалом; підбір матеріалів для виготовлення робочих органів з урахуванням властивостей перероблюваної сировини; зміцнення окремих ділянок або всієї робочої поверхні; забезпечення точного прогнозування ресурсу деталей; застосування спеціалізованого обладнання для ремонту та технічного обслуговування.

На основі аналізу матеріалів даного розділу та результатів досліджень [14] необхідно реалізувати комплекс заходів, спрямованих на підвищення

довговічності розглянутої конструкції роторної дробарки.

1.4. Аналіз основних вузлів, що визначають надійність експлуатації дробарки

Надійність роторної зернодробарки значною мірою визначається конструктивними особливостями її основних вузлів, які працюють в умовах інтенсивних динамічних та ударних навантажень. У процесі подрібнення зернових матеріалів елементи машини піддаються абразивному зносу, циклічним напруженням і вібраційним впливам, що зумовлює необхідність детального аналізу їх конструкції з метою підвищення довговічності та стабільності роботи обладнання.

Одним із ключових вузлів роторної дробарки є ротор, який забезпечує передачу енергії робочим органам і формує основні режими подрібнення. Від геометрії ротора, його маси, частоти обертання та якості балансування залежить рівень вібрацій, рівномірність навантаження та ступінь зносу суміжних елементів. Наявність навіть незначного дисбалансу призводить до підвищених динамічних навантажень на підшипникові вузли, що значно скорочує їх ресурс.

Від геометричних параметрів ротора роторної зернодробарки, його маси, частоти обертання та якості балансування безпосередньо залежить рівень вібрацій, рівномірність розподілу навантаження в робочій камері та інтенсивність зношування основних вузлів машини. У досліджуваній дробарці ротор виконує функцію основного елемента передачі кінетичної енергії робочим органам (молоткам), тому будь-які відхилення в його балансуванні призводять до порушення стабільності роботи всього агрегату.

При обертанні ротора з частотою, характерною для зернодробарок (як правило, 1500–3000 об/хв), навіть незначне зміщення центра маси відносно осі обертання спричиняє виникнення відцентрових сил, які мають періодичний

характер. Це викликає коливання ротора, що передаються на корпус і підшипникові вузли. У результаті виникають додаткові динамічні навантаження, які призводять до прискореного зносу підшипників, послаблення кріплень та зниження ресурсу роботи дробарки в цілому.

Особливістю роторної зернодробарки є також нерівномірний знос молотків у процесі експлуатації. Унаслідок цього порушується симетрія розташування мас відносно осі обертання, що викликає додатковий дисбаланс ротора. Це явище посилюється при несвоєчасній заміні або перестановці молотків, що є характерною проблемою експлуатації обладнання в умовах малих аграрних господарств і підприємств із недостатнім рівнем технічного обслуговування.

Підвищені вібрації, викликані дисбалансом, негативно впливають на роботу підшипникових вузлів досліджуваної дробарки. Вони спричиняють нерівномірний розподіл контактних напружень у підшипниках, підвищення температури в зоні тертя та інтенсифікацію процесів руйнування матеріалу. Крім того, вібрації передаються на корпус дробарки, що може викликати появу мікротріщин і поступову втрату жорсткості конструкції.

Слід також враховувати, що робота дробарки в зоні підвищених швидкостей обертання наближає її до умов виникнення резонансних явищ. У таких режимах навіть незначні конструктивні недоліки або експлуатаційні відхилення можуть призвести до різкого зростання амплітуди коливань і аварійних ситуацій. Тому забезпечення точного балансування ротора, оптимального розташування робочих органів і контролю їх зносу є необхідною умовою підвищення надійності роторної зернодробарки.

Формула сили дисбалансу ротора:

$$F = m \cdot e \cdot \omega$$

де F – відцентрова сила дисбалансу, Н;

m – неврівноважена маса, кг;

e – ексцентриситет, тобто відстань від центра маси до осі обертання, м;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с.

Кутову швидкість можна визначити так:

$$\omega = \frac{60}{2\pi n}$$

де n — частота обертання ротора, об/хв.

Отже, сила дисбалансу ротора пропорційна неврівноваженій масі, величині ексцентриситету та квадрату кутової швидкості. Це означає, що зі збільшенням частоти обертання навіть незначне порушення балансування може викликати суттєве зростання динамічного навантаження на підшипникові вузли та корпус роторної дробарки.

Таким чином, для досліджуваної дробарки одним із ключових напрямів підвищення її надійності є оптимізація конструкції ротора, удосконалення системи кріплення молотків, своєчасне технічне обслуговування та впровадження заходів щодо зниження вібраційних навантажень.

Важливу роль у забезпеченні надійності роторної зернодробарки відіграють робочі органи — молотки або ножі, які безпосередньо реалізують процес подрібнення зернового матеріалу. Саме на ці елементи припадає основна частина механічних навантажень, оскільки вони взаємодіють із зерном у режимі багаторазових ударів із високою частотою. У процесі роботи молотки перебувають під дією значних відцентрових сил, а також зазнають короткочасних імпульсних навантажень під час контакту із частинками матеріалу, що обумовлює складний напружено-деформований стан.

Умови експлуатації робочих органів характеризуються одночасною дією ударного та абразивного зносу. Ударний знос виникає внаслідок руйнування зерна при високошвидкісному контакті, тоді як абразивний — через наявність у зерновій масі мінеральних домішок (пісок, пил, частки ґрунту), які інтенсивно зношують

поверхню молотків. У результаті цього змінюється геометрія робочих органів, зменшується їх маса, притуплюються робочі кромки, що негативно впливає як на якість подрібнення, так і на енергоефективність процесу.

Конструктивні параметри робочих органів мають вирішальне значення для ефективності роботи дробарки. Форма молотків визначає характер взаємодії з матеріалом: плоскі молотки забезпечують інтенсивний ударний вплив, тоді як профільовані або вигнуті можуть покращувати захоплення частинок і підвищувати ефективність подрібнення. Маса молотків впливає на величину кінетичної енергії удару, а отже — на ступінь руйнування зерна. Водночас надмірне збільшення маси призводить до підвищення навантажень на ротор і підшипникові вузли, що може негативно позначитися на довговічності обладнання.

Матеріал виготовлення робочих органів також є критичним фактором. Застосування зносостійких сталей, термічно зміцнених поверхонь або наплавлення тврдосплавних шарів дозволяє значно зменшити швидкість зносу та підвищити ресурс молотків. Важливим є і спосіб кріплення робочих органів до ротора: шарнірне підвішування забезпечує самовирівнювання молотків під час роботи та зменшує ймовірність їх руйнування при попаданні твердих включень, тоді як жорстке кріплення підвищує точність позиціонування, але може збільшувати ударні навантаження.

Особливу увагу слід приділити явищу нерівномірного зносу молотків, яке є характерною проблемою експлуатації роторних дробарок. У процесі роботи окремі молотки можуть зношуватися швидше через нерівномірне завантаження або відмінності у властивостях матеріалу. Це призводить до порушення симетрії мас ротора та виникнення дисбалансу, що супроводжується підвищенням вібрацій, додатковими динамічними навантаженнями та прискореним зносом підшипників і інших вузлів машини.

Крім того, зношування робочих органів впливає на технологічні показники дробарки: збільшується тривалість подрібнення, зростає частка недоподрібнених

частинок, підвищується енергоспоживання. У зв'язку з цим важливим завданням є забезпечення рівномірного зносу молотків шляхом їх періодичної перестановки або заміни, а також оптимізація їх конструктивних параметрів.

Таким чином, підвищення надійності роторної зернодробарки значною мірою пов'язане з удосконаленням конструкції робочих органів, вибором ефективних матеріалів, забезпеченням раціонального способу їх кріплення та організацією своєчасного технічного обслуговування. Комплексний підхід до вирішення цих питань дозволяє зменшити інтенсивність зносу, стабілізувати роботу обладнання та збільшити термін його експлуатації.

Суттєве значення має підшипниковий вузол, який забезпечує обертання ротора та сприймає радіальні і осьові навантаження. Недостатня жорсткість конструкції, порушення умов змащування або потрапляння пилу в зону підшипників призводять до їх передчасного виходу з ладу. Тому герметизація підшипникових вузлів та вибір оптимальних режимів їх роботи є важливими факторами підвищення надійності дробарки.

Корпус роторної дробарки виконує не лише захисну, але й одну з ключових несучих функцій, забезпечуючи необхідну жорсткість всієї конструкції та точне взаємне розташування основних вузлів і агрегатів. Саме корпус сприймає і передає навантаження від ротора, робочих органів, приводу та інших елементів, тому його конструктивна досконалість безпосередньо впливає на надійність і довговічність машини. Крім того, корпус формує робочу камеру дроблення, геометрія якої визначає характер руху матеріалу та ефективність процесу подрібнення.

У процесі експлуатації корпус піддається комплексному впливу динамічних, вібраційних і ударних навантажень, що виникають унаслідок обертання ротора та взаємодії робочих органів із зерновою масою. При недостатній жорсткості або наявності конструктивних недоліків можливе виникнення локальних деформацій, які призводять до зміни геометрії робочої камери. Це, у свою чергу, викликає

порушення траєкторій руху частинок, нерівномірне навантаження на робочі органи та зниження ефективності подрібнення.

Особливо небезпечними є деформації в зоні встановлення підшипникових вузлів і кріплення ротора, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до порушення співвісності обертальних елементів. Це спричиняє додаткові вібрації, зростання динамічних навантажень і прискорений знос підшипників та інших елементів конструкції. Таким чином, забезпечення достатньої жорсткості корпусу є необхідною умовою стабільної роботи дробарки.

Внутрішні поверхні корпусу безпосередньо контактують із потоком зернового матеріалу, що містить абразивні домішки, тому вони піддаються інтенсивному зносу. Найбільшого впливу зазнають ділянки, на які припадає основний потік матеріалу та зона ударної взаємодії з робочими органами. У процесі експлуатації це призводить до витончення стінок, зміни форми робочої камери та погіршення умов подрібнення. Для зменшення негативного впливу абразивного зносу доцільно застосовувати змінні зносостійкі накладки, футерування внутрішніх поверхонь або використання матеріалів із підвищеною твердістю та зносостійкістю.

Крім механічних навантажень, корпус піддається також впливу пилового середовища, яке може проникати в зони з'єднань і спричиняти додатковий знос елементів та погіршення умов експлуатації. Наявність пилу та дрібних частинок у поєднанні з вібраціями може призводити до послаблення різьбових з'єднань, що знижує загальну надійність конструкції. Тому важливим є забезпечення герметичності корпусу, а також використання конструктивних рішень, які зменшують накопичення пилу та полегшують обслуговування.

Таким чином, корпус роторної дробарки є одним із визначальних елементів, від якого залежить надійність, ефективність і довговічність роботи обладнання. Підвищення його експлуатаційних характеристик можливе шляхом оптимізації конструкції, збільшення жорсткості, застосування зносостійких матеріалів, а

також впровадження конструктивних рішень, спрямованих на зменшення вібрацій і рівномірний розподіл навантажень. Комплексний підхід до вдосконалення корпусу дозволяє забезпечити стабільну роботу дробарки та збільшити її ресурс.

Важливим конструктивним елементом роторної зернодробарки є сито, яке формує фракційний склад готового продукту та безпосередньо впливає на технологічні показники роботи обладнання, зокрема продуктивність, енергоефективність і якість подрібнення. Сито виконує роль класифікуючого елемента, що забезпечує відокремлення частинок, які досягли заданих розмірів, і утримує більші фракції в робочій камері до їх подальшого подрібнення.

Ефективність функціонування сита визначається його конструктивними параметрами, такими як діаметр і форма отворів, товщина матеріалу, площа відкритої поверхні, а також просторове розташування в робочій камері дробарки. Збільшення площі відкритої поверхні сприяє підвищенню пропускної здатності, однак водночас може знижувати міцність конструкції та її стійкість до механічних навантажень. Тому вибір геометричних параметрів сит є компромісом між продуктивністю та довговічністю.

У процесі експлуатації сито піддається інтенсивному механічному впливу з боку частинок матеріалу, що рухаються з високою швидкістю. Особливо значний вплив мають тверді мінеральні домішки, які спричиняють абразивний знос поверхні та поступове збільшення розмірів отворів. Це призводить до порушення заданого гранулометричного складу продукту, зниження якості подрібнення та необхідності частішої заміни сит.

Окремою проблемою є засмічення отворів сит, яке виникає внаслідок підвищеної вологості матеріалу, наявності клейких частинок або недостатньо інтенсивного руху повітря в робочій зоні. Засмічення зменшує ефективну площу проходу, що призводить до накопичення матеріалу в камері дроблення, зростання навантаження на ротор і робочі органи, а також збільшення енергоспоживання. У

таких умовах погіршуються умови подрібнення, зростає нерівномірність навантаження на вузли машини та прискорюється їх знос.

Матеріал виготовлення сит має відповідати вимогам підвищеної зносостійкості та міцності. Найбільш доцільним є використання легованих або термічно зміцнених сталей, а також застосування спеціальних покриттів, що зменшують коефіцієнт тертя та підвищують стійкість до абразивного зносу. У деяких випадках використовують змінні або секційні сита, що дозволяє локально замінювати найбільш зношені ділянки без повної заміни елемента.

З конструктивної точки зору важливим є також спосіб кріплення сит у корпусі дробарки. Ненадійне або недостатньо жорстке кріплення може спричинити додаткові вібрації, деформації та руйнування елемента. Водночас конструкція повинна забезпечувати зручність монтажу та демонтажу, що є важливим з точки зору технічного обслуговування.

Таким чином, сито є одним із визначальних елементів роторної дробарки, від якого залежить не лише якість готового продукту, але й ефективність роботи обладнання в цілому. Оптимізація конструктивних параметрів сит, вибір матеріалів із високою зносостійкістю, а також забезпечення належних умов експлуатації дозволяють підвищити продуктивність дробарки, зменшити енерговитрати та збільшити термін служби обладнання.

Аналіз конструктивних вузлів роторної дробарки показує, що надійність обладнання залежить від комплексної взаємодії всіх його елементів. Недоліки у конструкції або експлуатації хоча б одного вузла можуть призвести до зниження ефективності роботи всієї системи. У зв'язку з цим особливого значення набуває оптимізація конструктивних параметрів, вибір зносостійких матеріалів, забезпечення балансування ротора та вдосконалення умов експлуатації, що дозволить підвищити ресурс і надійність дробарки в цілому.

1.5. Сучасні підходи до підвищення надійності та аналіз сервісно-інженерних рішень

Підвищення надійності роторних зернодробарок є важливим завданням у забезпеченні ефективності процесів подрібнення зернових матеріалів. Надійність таких машин визначається їх здатністю працювати в умовах інтенсивних динамічних та ударних навантажень без втрати функціональних характеристик протягом заданого терміну експлуатації. З огляду на специфіку роботи роторних дробарок, сучасні підходи до підвищення їх надійності базуються на поєднанні конструктивних удосконалень і впровадженні ефективних сервісно-інженерних рішень.

Одним із ключових напрямів є оптимізація конструкції основних вузлів дробарки. Зокрема, підвищення точності балансування ротора дозволяє зменшити рівень вібрацій і динамічних навантажень на підшипникові вузли, що сприяє збільшенню їх ресурсу. Дослідження в галузі ротодинаміки показують, що дисбаланс ротора є однією з основних причин виникнення вібрацій і передчасного зносу елементів обертових машин [26, 32]. У зв'язку з цим важливим є застосування технологій динамічного балансування та контроль стану ротора під час експлуатації.

У зв'язку з цим важливого значення набуває застосування технологій динамічного балансування ротора, а також організація систематичного контролю його технічного стану в процесі експлуатації. Динамічне балансування дозволяє мінімізувати неврівноважені сили, що виникають унаслідок зміщення центра маси відносно осі обертання, і, відповідно, зменшити рівень вібрацій та динамічних навантажень, які передаються на підшипникові вузли та інші елементи конструкції.

Згідно з положеннями теорії ротодинаміки, неврівноваженість ротора призводить до виникнення відцентрових сил, величина яких пропорційна масі дисбалансу, ексцентриситету та квадрату кутової швидкості обертання. При високих частотах обертання, характерних для роторних зернодробарок, навіть незначні відхилення у балансуванні можуть викликати суттєве зростання

амплітуди коливань. Це, у свою чергу, спричиняє додаткові циклічні навантаження, що призводять до втомного руйнування матеріалу, зниження ресурсу підшипників і погіршення умов роботи всього обладнання.

Динамічне балансування ротора здійснюється з урахуванням розподілу мас по довжині та радіусу ротора і дозволяє забезпечити рівномірність обертання при робочих швидкостях. На відміну від статичного балансування, яке враховує лише загальний центр маси, динамічне балансування дозволяє усунути як радіальні, так і моментні дисбаланси, що є особливо важливим для швидкообертючих роторів.

Поряд із балансуванням важливим є впровадження систем контролю технічного стану ротора під час експлуатації. До таких систем належать методи вібраційної діагностики, які дозволяють оцінювати спектр коливань і виявляти характерні ознаки дисбалансу, розцентрування або дефектів підшипників. Регулярний моніторинг параметрів вібрації дає змогу своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи та запобігати розвитку аварійних ситуацій.

Таким чином, поєднання технологій динамічного балансування з сучасними методами діагностики та контролю стану ротора є необхідною умовою підвищення надійності роторних зернодробарок. Це дозволяє знизити рівень вібрацій, зменшити інтенсивність зносу конструктивних елементів і забезпечити стабільну роботу обладнання протягом усього терміну експлуатації.

Другим важливим напрямом є підвищення зносостійкості робочих органів дробарки. Використання легованих сталей, термічної обробки, а також нанесення зміцнюючих покриттів дозволяє значно зменшити інтенсивність абразивного зносу молотків або ножів. Як свідчать дослідження, застосування сучасних матеріалів і технологій зміцнення може збільшити ресурс робочих органів у декілька разів [24, 30].

Використання легованих сталей, термічної обробки, а також нанесення зміцнюючих покриттів є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення зносостійкості робочих органів роторних зернодробарок. Умови експлуатації молотків або ножів характеризуються поєднанням інтенсивного ударного та

абразивного зносу, що обумовлює необхідність забезпечення високих показників твердості, в'язкості та опору втомному руйнуванню матеріалу.

Застосування легованих сталей дозволяє суттєво покращити механічні властивості робочих органів за рахунок введення в їх склад таких елементів, як хром, марганець, молібден та ванадій. Ці елементи сприяють формуванню дрібнозернистої структури та утворенню твердих карбідних фаз, які підвищують опір матеріалу до абразивного зносу. Крім того, легування дозволяє забезпечити оптимальне поєднання твердості та ударної в'язкості, що є критично важливим для деталей, які працюють в умовах циклічних ударних навантажень.

Термічна обробка, зокрема гартування з наступним відпуском, забезпечує формування загартованої структури з підвищеною твердістю поверхні при збереженні достатньої пластичності серцевини. Така структура дозволяє зменшити глибину проникнення абразивних частинок у поверхню матеріалу, знижуючи швидкість його зношування. Одночасно з цим зменшується ймовірність утворення тріщин та крихкого руйнування під дією ударних навантажень.

Додаткове підвищення зносостійкості досягається шляхом нанесення зміцнюючих покриттів або наплавлення зносостійких шарів. Найбільш ефективними є покриття на основі карбідів вольфраму, хрому або титану, які характеризуються високою твердістю та стійкістю до абразивного зносу. Такі покриття створюють бар'єрний шар, що перешкоджає прямому контакту основного металу з абразивними частинками, значно зменшуючи інтенсивність руйнування поверхні.

Ефективність використання зазначених технологій пояснюється також з позицій трибології. Абразивний знос відбувається внаслідок мікрорізання або пластичного деформування поверхні твердими частинками. Підвищення твердості матеріалу зменшує глибину їх проникнення, а наявність твердих фаз у структурі перешкоджає розвитку мікротріщин і відколів. У результаті цього швидкість зносу суттєво знижується, а ресурс роботи деталей збільшується.

Експериментальні дослідження показують, що застосування легованих сталей у поєднанні з термічною обробкою та зміцнюючими покриттями дозволяє

збільшити термін служби робочих органів у 2–4 рази залежно від умов експлуатації та характеристик оброблюваного матеріалу. При цьому зменшується частота заміни молотків або ножів, знижуються витрати на технічне обслуговування та підвищується стабільність роботи дробарки.

Таким чином, використання сучасних матеріалів і технологій зміцнення є обґрунтованим та ефективним засобом підвищення надійності роторних зернодробарок. Комплексне застосування легування, термічної обробки та захисних покриттів дозволяє значно зменшити інтенсивність зносу, підвищити довговічність робочих органів і забезпечити стабільність технологічного процесу подрібнення.

Суттєвим фактором підвищення надійності є також оптимізація умов експлуатації дробарки. Вибір раціональних режимів роботи, зокрема частоти обертання ротора та ступеня завантаження, дозволяє зменшити динамічні навантаження та забезпечити стабільність технологічного процесу. При цьому важливу роль відіграє рівномірність подачі матеріалу, яка впливає на характер навантаження робочих органів і вузлів машини.

Сучасні сервісно-інженерні підходи передбачають перехід до систем технічного обслуговування за станом обладнання. Використання методів вібраційної діагностики дозволяє своєчасно виявляти дисбаланс ротора, знос підшипників та інші дефекти, що розвиваються.

Використання методів вібраційної діагностики є одним із найбільш ефективних інструментів контролю технічного стану роторних зернодробарок, оскільки дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку без зупинки обладнання. Основою цього підходу є аналіз параметрів коливань, що виникають у процесі роботи машини, які безпосередньо відображають зміну динамічного стану її вузлів.

При наявності дисбалансу ротора у вібраційному сигналі спостерігається характерне зростання амплітуди коливань на частоті обертання (основна гармоніка), що пов'язано з дією відцентрових сил. Аналіз спектру вібрацій дозволяє не лише встановити факт дисбалансу, але й оцінити його величину та

локалізацію. Це дає можливість своєчасно провести балансування ротора та запобігти розвитку небезпечних режимів роботи.

Знос підшипникових вузлів проявляється у вигляді появи високочастотних складових у спектрі вібрацій, пов'язаних із дефектами доріжок кочення або тіл кочення. На початкових стадіях такі дефекти можуть бути незначними та не впливати суттєво на роботу машини, однак їх своєчасне виявлення дозволяє запобігти аварійному виходу з ладу підшипників. Для підвищення точності діагностики застосовують методи спектрального аналізу, обробки огинаючої сигналу та інші сучасні алгоритми аналізу вібрацій.

Крім того, вібраційна діагностика дозволяє виявляти такі дефекти, як розцентрування валів, послаблення кріплень, деформації корпусу, нерівномірний знос робочих органів та інші відхилення від нормального режиму роботи. Кожен із цих дефектів має характерні ознаки у спектрі вібрацій, що дає змогу здійснювати їх ідентифікацію на основі аналізу частотних і амплітудних параметрів сигналу.

Практична реалізація вібраційної діагностики передбачає встановлення датчиків (віброакселераторів) на ключових елементах конструкції, зокрема в зоні підшипникових вузлів та корпусу дробарки. Отримані сигнали передаються на систему збору та обробки даних, де здійснюється їх аналіз у часовій та частотній областях. Використання сучасних програмних засобів дозволяє автоматизувати процес діагностики та здійснювати безперервний моніторинг стану обладнання.

Застосування методів вібраційної діагностики у поєднанні з іншими засобами контролю (температурними датчиками, аналізом шуму, контролем струмів електродвигуна) дозволяє створити комплексну систему технічного моніторингу. Це забезпечує підвищення надійності роторної зернодробарки, зменшення кількості аварійних зупинок та оптимізацію витрат на технічне обслуговування.

Таким чином, вібраційна діагностика є ефективним інструментом сервісно-інженерного забезпечення, який дозволяє не лише своєчасно виявляти дефекти, але й прогнозувати розвиток несправностей, забезпечуючи перехід до обслуговування за фактичним технічним станом обладнання.

Впровадження концепції predictive maintenance (прогностичного обслуговування) дає можливість прогнозувати відмови та виконувати ремонтні роботи до моменту їх виникнення [36].

Впровадження концепції predictive maintenance (прогностичного обслуговування) є одним із найбільш перспективних напрямів підвищення надійності сучасного обладнання, зокрема роторних зернодробарок. На відміну від традиційних підходів, таких як ремонт після відмови або планово-попереджувальне обслуговування, прогностичне обслуговування базується на безперервному моніторингу технічного стану обладнання та прогнозуванні моменту виникнення відмови.

Суть даного підходу полягає у зборі та аналізі даних про роботу машини в режимі реального часу. Для цього використовуються датчики вібрації, температури, навантаження, швидкості обертання та інші вимірювальні засоби, які встановлюються на ключових вузлах дробарки, зокрема на підшипникових опорах, корпусі та приводі. Отримані дані передаються до систем обробки, де за допомогою алгоритмів аналізу визначаються відхилення від нормального режиму роботи та прогнозується розвиток дефектів.

Згідно з сучасними дослідженнями, застосування predictive maintenance дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку, що значно знижує ризик аварійних відмов і незапланованих простоїв обладнання [36]

. При цьому використання методів машинного навчання та аналізу великих даних дає можливість підвищити точність прогнозування технічного стану машин і визначати залишковий ресурс їх роботи [37]

Для роторних зернодробарок особливе значення має контроль стану ротора, підшипникових вузлів і робочих органів, які є найбільш навантаженими елементами. Наприклад, поступове зростання рівня вібрацій або температури може свідчити про розвиток дисбалансу, зносу підшипників або порушення умов змащування. Завдяки прогностичним моделям ці зміни можуть бути проаналізовані з метою визначення часу, коли параметри досягнуть критичних значень, що дозволяє заздалегідь планувати ремонтні роботи.

Крім того, впровадження прогностичного обслуговування дозволяє оптимізувати витрати на технічне обслуговування, оскільки ремонтні роботи виконуються не за графіком, а за фактичним станом обладнання. Це сприяє більш раціональному використанню ресурсів, зменшенню витрат на запасні частини та підвищенню коефіцієнта готовності машин.

З технічної точки зору реалізація predictive maintenance передбачає створення інтегрованої системи, що включає сенсорні пристрої, засоби передачі даних, програмне забезпечення для обробки інформації та алгоритми прогнозування. У сучасних умовах такі системи можуть бути реалізовані з використанням технологій Інтернету речей (IoT), що дозволяє забезпечити дистанційний контроль і централізоване управління технічним станом обладнання.

Таким чином, впровадження концепції прогностичного обслуговування є ефективним інструментом підвищення надійності роторних зернодробарок. Воно дозволяє перейти від реактивного до превентивного управління технічним станом, забезпечуючи своєчасне виявлення дефектів, зниження ризику відмов та підвищення ефективності експлуатації обладнання.

Особливого значення для роторних зернодробарок набуває контроль технічного стану підшипникових вузлів, які працюють в умовах підвищених навантажень і забрудненого середовища. Використання сучасних датчиків вібрації та температури дозволяє здійснювати безперервний моніторинг їх стану та оперативно реагувати на відхилення від нормального режиму роботи. Такі системи широко застосовуються в сучасній промисловості та забезпечують підвищення надійності обладнання [36, 37].

Крім того, важливим елементом сервісно-інженерного забезпечення є організація ефективного технічного обслуговування, що включає регулярну перевірку стану робочих органів, балансування ротора, контроль кріплень і очищення обладнання від пилу та відходів. Використання принципів планово-попереджувального ремонту в поєднанні з сучасними методами діагностики дозволяє значно знизити ймовірність відмов і підвищити ресурс роботи дробарки.

Таким чином, сучасні підходи до підвищення надійності роторних зернодробарок базуються на комплексному врахуванні конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Поєднання оптимізації конструкції, застосування зносостійких матеріалів, контролю технічного стану та впровадження інтелектуальних систем обслуговування дозволяє забезпечити стабільну роботу обладнання, зменшити витрати на ремонт і підвищити ефективність виробничих процесів.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу конструктивних особливостей роторних зернодробарок та умов їх експлуатації встановлено, що ефективність і надійність роботи обладнання визначаються сукупністю конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Роторні дробарки широко застосовуються у переробці зернової сировини завдяки високій продуктивності та простоті конструкції, проте їх робота супроводжується значними динамічними навантаженнями, що зумовлює інтенсивний знос основних вузлів.

Проведений аналіз показав, що ключовими елементами, які визначають надійність дробарки, є ротор, робочі органи, підшипникові вузли, корпус та сито. Порушення балансування ротора, нерівномірний знос молотків, зниження жорсткості корпусу та засмічення сит призводять до виникнення вібрацій, нерівномірного навантаження та прискореного зношування елементів машини.

Встановлено, що основними причинами зниження ресурсу дробарок є абразивний та ударний знос робочих органів, динамічні перевантаження, порушення режимів експлуатації, а також недостатній рівень технічного обслуговування. Наявність дисбалансу ротора та дефектів підшипникових вузлів суттєво погіршує умови роботи обладнання і може призводити до аварійних відмов.

Аналіз сучасних підходів до підвищення надійності показав, що ефективними є заходи, спрямовані на оптимізацію конструктивних параметрів, застосування зносостійких матеріалів, удосконалення геометрії робочих органів та забезпечення точного балансування ротора. Важливу роль відіграють також сучасні сервісно-інженерні рішення, зокрема використання методів вібраційної діагностики та впровадження концепції обслуговування за технічним станом, що дозволяє своєчасно виявляти дефекти та запобігати відмовам.

Таким чином, підвищення надійності роторних зернодробарок потребує комплексного підходу, який поєднує вдосконалення конструкції, оптимізацію режимів роботи та впровадження сучасних методів технічного обслуговування. Отримані результати аналізу є підґрунтям для подальших теоретичних досліджень та обґрунтування напрямів оптимізації конструктивних елементів дробарки.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ.

2.1. Теоретичні основи процесу подрібнення зерна

Основні конструктивні та технологічні компоненти роторної дробарки, реалізовані у запропонованих патентних рішеннях, були обґрунтовані на основі методики, розробленої попередніми дослідженнями [12, 25, 31]. Відповідно до цієї методики, з метою вдосконалення процесу подрібнення та формування підходів до підвищення довговічності обладнання, роторна дробарка розглядається як складна автономна технічна система (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 - Схема основних елементів дробарки

Запропонована схема роторної дробарки включає взаємопов'язані підсистеми, окремі деталі та робочі поверхні. Найсуттєвіший вплив на надійність і ефективність роботи мають нижчі рівні ієрархії - рифлі ротора і протириза. Ці елементи відносяться до робочих поверхонь, що безпосередньо контактують із матеріалом і забезпечують виконання основної технологічної операції - подрібнення зерна. Основна функція рифлів (поверхонь ротора і статора), які є базовими елементами системи «роторна дробарка», полягає у створенні умов для поділу зернин на визначену кількість частинок до досягнення необхідного модуля помелу та ступеня подрібнення зернофуражу.

Інші робочі поверхні, представлені в ієрархічній структурі, мають менший вплив на ефективність процесу порівняно з рифлями ротора і статора. У ході подрібнення зернової сировини відбувається поступове зношування рифлених поверхонь, що обумовлено відмінностями фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу.

Технічний результат полягає у підвищенні зносостійкості, надійності та ефективності процесу подрібнення шляхом зменшення інтенсивності зношування рифлених поверхонь ротора та рифленого руйнівного елемента, закріпленого на статорі, які безпосередньо взаємодіють із матеріалом.

У робочій зоні подрібнювача розташовані нерухомий рифлений руйнівний елемент, закріплений на статорі, та обертовий ротор із n -ою кількістю рифлів, кожна з яких під час одного оберту вступає у взаємодію з рифленим елементом статора. Унаслідок цього зношування рифлів ротора за один оберт є у n разів меншим порівняно зі зносом нерухомого елемента. Отже, найбільше навантаження припадає саме на рифлі статора, які зазнають найінтенсивнішого зношування.

Необхідно визначити такі умови експлуатації, які забезпечать підвищення ресурсу робочих поверхонь статора та дозволять адаптувати дробарку до різних видів вихідної сировини шляхом регулювання робочого зазору.

Для забезпечення стійкого, надійного та ефективного процесу розділення зернового матеріалу необхідно обґрунтувати форму рифлів і розміщення протиріза (рисунок 2.1) з урахуванням їх взаємодії з матеріалом у робочій камері дробарки. У зв'язку з цим рифлі, що належать до нижчого рівня ієрархічної структури або робочих поверхонь, повинні характеризуватися раціональними геометричними параметрами та високою зносостійкістю, яка визначається фізико-механічними властивостями матеріалу та інтенсивністю експлуатації.

Для стабільного перебігу процесу подрібнення необхідно обґрунтувати підвищення зносостійкості рифлів статора. Надійність функціонування роторної дробарки протягом заданого ресурсу забезпечується формуванням необхідного рівня зносостійкості робочої поверхні протиріза, основною характеристикою якої є властивості її поверхневого шару.

У процесі роботи роторної дробарки зазначені робочі поверхні повинні підтримувати технологічно обґрунтований зазор у зоні контакту з матеріалом, що подрібнюється.

З метою підвищення надійності роботи роторної дробарки необхідно встановити чинники, що визначають зносостійкість рифлених поверхонь статора, які є нижчим елементом технічної системи «роторна дробарка».

Стійкість до зношування робочих поверхонь роторної дробарки визначається видом зернової сировини та концентрацією абразивних частинок у вигляді мінеральних домішок, присутніх у її складі. На основі аналізу, виконаного в розділі 1, заходи щодо зменшення зношування робочих елементів можна подати у вигляді узагальненої схеми (рисунок 2.2).

Таким чином, основними напрямками підвищення зносостійкості роторної дробарки є: попередня обробка продукту подрібнення, очищення робочої порожнини та створення оптимальних умов для роботи поверхонь, зміцнення робочих елементів, своєчасне проведення їх ремонту або заміни, а також використання спеціальних матеріалів.



Рисунок 2.2 - Підходи до підвищення зносостійкості в роторній дробарці

Проведений аналіз дав змогу сформулювати підходи до підвищення зносостійкості робочих поверхонь ротора і статора, параметри яких суттєво

впливають на якість кінцевого продукту, що має відповідати зоотехнічним вимогам (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Способи підвищення зносостійкості ротора і статора

Результативність застосування одного або кількох зазначених заходів визначається на основі теоретичних і експериментальних досліджень, а також залежить від обсягів переробки, виду сировини та її фізико-механічних характеристик.

2.2. Динаміка роботи ротора

Процес подрібнення в роторній дробарці з горизонтальним розташуванням ротора був проаналізований з позицій кінетики. Використовуючи підхід, запропонований у попередніх дослідженнях, у межах теоретичного аналізу були прийняті такі припущення: враховується лише плоский рух зернини, її форма вважається овальною, а переміщення відбувається виключно в поперечному перерізі дробарки.

Руйнування окремої зернини масою m_z під час першого зрізу описується дією рівнодійної сили F_p . При прикладанні зусилля зрізу F_{cp} до частини зернини, що розташована в пазі ротора, у момент досягнення критичного напруження τ

вона починає переміщатися, при цьому виникає інерційна сила $F_{и}$, а також сила тертя $F_{тр.з}$, що діє на масу частини зернини $m_{ч.з}$ (рисунок 2.4).

$$F_p = F_{ср} + F_i + F_{тр} \quad (2.1)$$

Як видно зі схеми, найбільші навантаження та інтенсивне зношування, зумовлене постійним тертям об масу подрібнюваного матеріалу, припадають на кромки рифлів ротора і статора. При цьому, як зазначалося раніше, рифлі протиріза сприймають у десятки разів більше впливів порівняно з рифлями ротора, що суттєво скорочує їх ресурс.

Вирішальним параметром, який визначає характер виникнення вигинальних, стираючих та інших напружень у зоні зрізу, є зазор між кромками рифлів ротора і статора δ . У процесі експлуатації його величина збільшується внаслідок зношування, спричиненого дією сил тертя між зерниною та абразивними частинками.

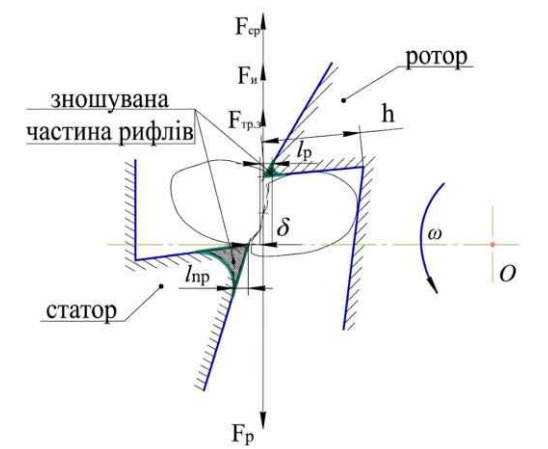


Рисунок 2.4 - Схема зрізу зернини робочими органами дробарки і зони кромки рифлів, що піддаються найбільшому зношуванню

Геометричні параметри робочих органів разом із частотою обертання ротора, величиною робочого зазору та іншими характеристиками визначають ефективність функціонування роторної дробарки. Теоретичні обґрунтування та експериментальні дослідження показали, що прямокутна форма паза не забезпечує надійного утримання зернини до моменту її зрізу. З огляду на це найбільш доцільною є трикутна форма рифлів, при якій кінець одного паза

переходить у початок наступного [22].

Для забезпечення стабільного та якісного подрібнення зернової сировини рифлі статора повинні за своїми геометричними характеристиками відповідати рифлям ротора і мати достатню міцність, щоб зберігати задану форму в процесі експлуатації. У протилежному випадку виникатиме порушення взаємодії за схемою «вістря по вістря» [22].

Аналізуючи робочі поверхні елементів нижчого рівня ієрархічної структури, слід зазначити, що пази ротора виконують функцію переміщення зернового матеріалу до зони руйнування, одночасно забезпечуючи умови для його захоплення.

Найбільші навантаження в процесі подрібнення сприймає протиріз, у зв'язку з чим його зношування відбувається інтенсивніше. При цьому зменшення гостроти його робочої кромки (рифля) призводить до збільшення робочого зазору та зниження ефективності руйнування матеріалу.

Як показано на рисунку 2.5, формування ріжучої кромки відбувається за рахунок рифлів роторної дробарки, які мають асиметричні бічні поверхні вістря - вузьку та широку. Кут різання γ_r дорівнює 90° і формується з урахуванням кута вістря β , кута нахилу нижньої грані паза β_1 та кута нахилу верхньої грані β_2 . Значення цих параметрів визначаються індивідуально для кожної конструкції подрібнювача.

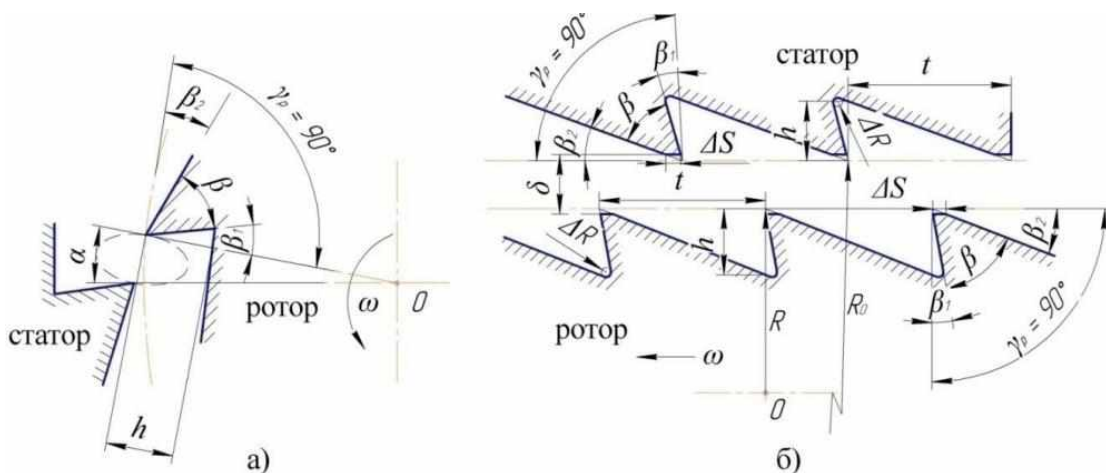


Рисунок 2.5 - Геометрія рифлів ротора і статора: а) поперечний вигляд, де α - кут заклинювання зернини перед зрізом, б) розгорнутий вигляд

Основні геометричні характеристики рифлів задаються кроком t між сусідніми вершинами та їх висотою h . Менш визначені параметри, такі як площа площадки ΔS і радіус заокруглення ΔR рифлів, як правило, не враховуються в розрахунках [22].

Для подальших розрахунків використаємо значення параметрів t і h , [32]. Наприклад, при подрібненні пшениці із середнім модулем помелу ($M = 1,2 \dots 1,8$ мм), за умови мінімального робочого зазору ($\delta \approx 0$ мм) і кутів $\beta_1 = 15^\circ$, $\beta_2 = 15^\circ$ та $\beta = 60^\circ$, отримано значення $t = 7,6$ мм і $h = 1,2$ мм. Діаметр ротора, за аналогією з [22], приймається $D = 0,1$ м для пшениці, ячменю, вівса та кукурудзи.

2.3. Розрахунок навантажень на робочі органи

Крім того, на основі аналізу етапів руху зернин у робочій камері роторної дробарки, наведених у [22], встановлено, що особливий інтерес для даного дослідження становить подальший теоретичний опис взаємодії рифлених поверхонь ротора і статора з зерновим матеріалом, представлений на рисунках 2.6 г і д.

У робочій камері подрібнення діє значна кількість сил тертя, що виникають як між окремими зернинами, так і між шаром матеріалу та робочими елементами роторної дробарки. Їх величина визначається властивостями зернових частинок, ступенем збереження їх структури (наявністю мікротріщин), а також характером прикладених руйнівних зусиль (кут падіння, гострота рифлів, швидкість впливу тощо) [32].

Рифлена поверхня статора орієнтована за напрямком обертання ротора від зони приймання до зони розвантаження. При цьому напрямна рифленої поверхні статора розташована в межах кутового інтервалу до 90° від приймальної камери, а сама рифлена поверхня може бути реалізована на одному або кількох окремих елементах, які встановлюються на статорі з можливістю їх тимчасового кріплення та регулювання зазору між робочими поверхнями статора і ротора.

Попередньо встановлено, що для забезпечення малого та середнього модуля помелу в роторній дробарці достатньо використання одного протиріза на статорі. Враховуючи припущення, висловлене у цій роботі, що підвищення ресурсу робочих поверхонь можливе за рахунок зміни геометрії робочої зони та зміщення області руйнування вздовж твірної статора у напрямку до зони розвантаження, сформульовано новий підхід до збільшення довговічності протиріза.

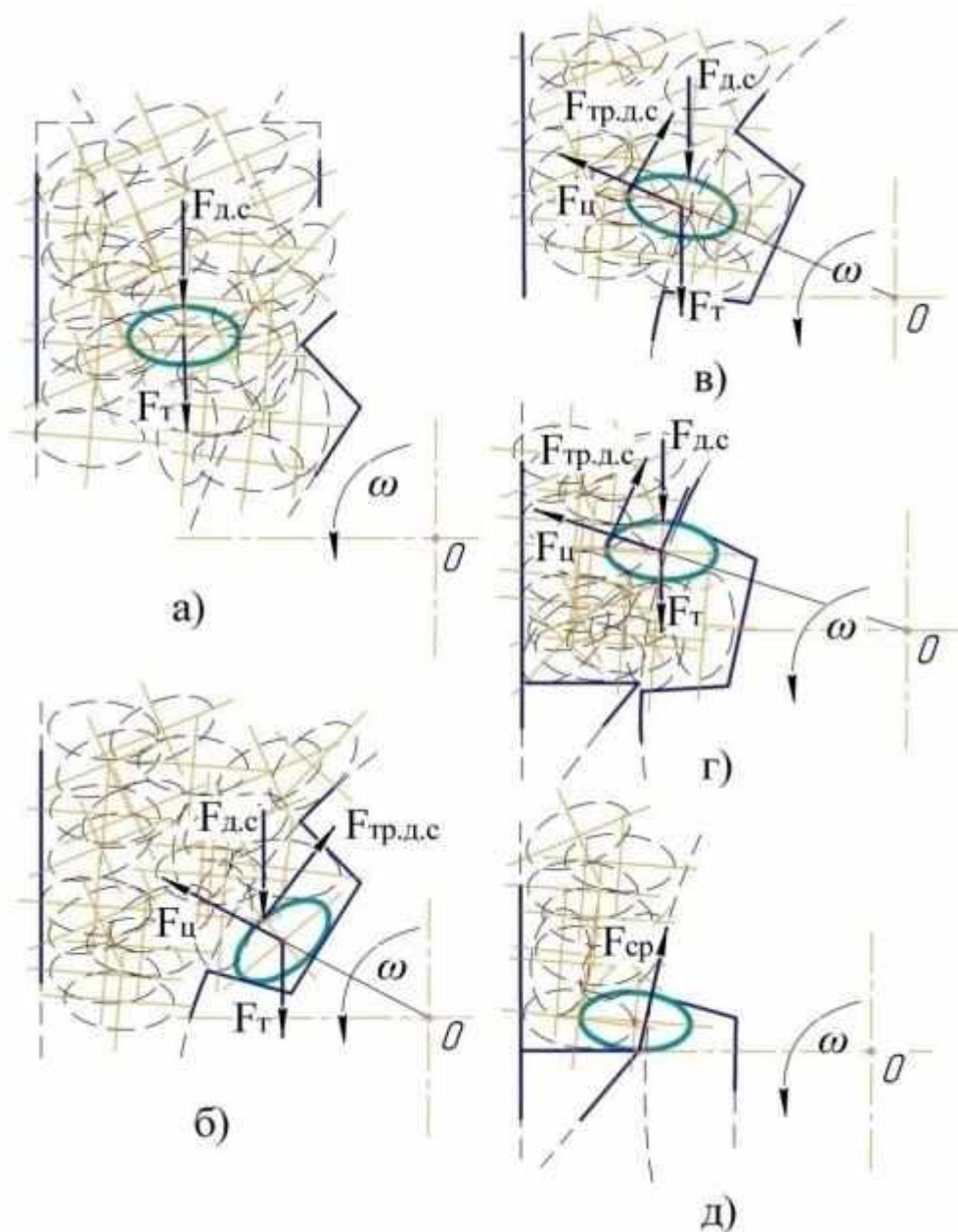


Рисунок 2.6 - Схема сил, що діють на зернину в дробарці: а) у масі зерна, б), в), г) – рух у дробильній камері, д) – у момент фіксації до зрізу

Застосування даних конструктивних рішень із переміщенням зони руйнування в межах наступних 90° обертання ротора дозволяє створити умови, за яких інерційні сили додатково сприятимуть процесу подрібнення. Розглянемо кілька варіантів поступового переміщення зони зрізу (протиріза) зернини в межах цього кутового інтервалу γ . У такому випадку протиріз переміщується вздовж твірної ротора і закріплюється в одній із позицій на статорі, змінюючи при цьому кут падіння рифлів ротора відносно його робочої кромки.

На зернини діє відцентрова сила, спрямована від осі обертання, яка виштовхує їх у радіальному напрямку та ускладнює їх утримання в пазах ротора. Водночас дія сил інерції, тертя, ваги та тиску зернового шару забезпечує певну стабілізацію положення зернини у пазі. Однак вплив цих сил у різних положеннях протиріза є неоднаковим.

Рівнодійна сил F_R на цьому етапі визначається як результат дії трьох основних складових: сили тиску зернового шару $F_{д.ст.}$, сили тяжіння одиничної зернини F_T та відцентрової сили $F_{ц.}$

Як показано на схемі рисунка 2.7, кут γ може бути поділений на окремі інтервали γ_1 , γ_2 , γ_3 і γ , що характеризують положення протиріза відносно горизонтальної осі ротора.

При $\gamma_1 = 0^\circ$ (варіант 1) рівнодійна сила F_{R1} спрямована у бік поверхні статора з незначним зміщенням нижче кромки протиріза, що ускладнює фіксацію зернини при зрізі в пазі ротора та може спричинити утворення більш дрібних частинок. Це призводить до відхилення від заданого модуля помелу та збільшення енергетичних витрат. У таких умовах зношування протиріза можна вважати типовим, причому воно відбувається переважно у верхній частині рифленої кромки.

При $\gamma_2 = 30^\circ$ (варіант 2) спостерігається картина, подібна до випадку γ_1 . Водночас можна очікувати зниження енерговитрат на руйнування, оскільки напрямок рівнодійної сили F_{R2} практично співпадає з напрямком ріжучої кромки протиріза. У цих умовах зношування протиріза відбувається

інтенсивніше, ніж при γ_1 , і поширюється на обидві сторони рифленої кромки.

При $\gamma_3 = 60^\circ$ (варіант 3) характер взаємодії змінюється: рівнодійна сила F_{P3} , аналогічно першому варіанту, орієнтована переважно у бік поверхні статора, а не до вістря кромки, причому з більшою інтенсивністю. Це призводить до зменшення ефективності руйнування зернини, одночасно ускладнюючи її фіксацію в зоні зрізу, що негативно впливає на продуктивність. При цьому значення сили тиску шару $F_{д.ст.3}$ є найменшим серед розглянутих варіантів. Зношування кромки протиріза відбувається за аналогією з першим варіантом, але з підвищеною інтенсивністю.

При $\gamma = 90^\circ$, тобто за максимального віддалення протиріза (варіант 4), спостерігається інша картина взаємодії. У цьому випадку відсутня сила тиску шару, а інші сили орієнтовані вертикально, паралельно осі обертання ротора. У таких умовах на процес поділу зернин впливає переважно інерція ротора, внаслідок чого частинки виходять із пазів. Це спричиняє погіршення показників процесу подрібнення (зниження продуктивності та якості, збільшення енерговитрат), проте зношування протиріза, ймовірно, буде мінімальним.

З теоретичної точки зору найбільш раціональним серед розглянутих є варіант із кутом $\gamma_2 = 30^\circ$. Оптимальний інтервал кута падіння, за якого досягається найкраще співвідношення ефективності та надійності роботи роторної дробарки, можна визначити в межах $\gamma = 25^\circ \dots 50^\circ$.

Отримані теоретичні та кінематичні залежності узгоджуються з результатами досліджень інших авторів [6, 7, 10, 23].

2.4. Теоретичні основи надійності машин

Як показав аналіз функціонування роторної дробарки, рух зернового матеріалу в її робочій камері має складний стохастичний характер. У зв'язку з цим вплив фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу та матеріалу робочих органів на величину руйнівного зусилля і знос протиріза, разом із впливом кута падіння та інших факторів, потребує додаткового дослідження як

у теоретичному, так і в експериментальному аспектах.

Уточнення впливу зношування протиріза на зміну робочого зазору в процесі експлуатації роторної дробарки при різних варіантах його розташування відносно твірної ротора передбачено в межах подальших експериментальних досліджень.

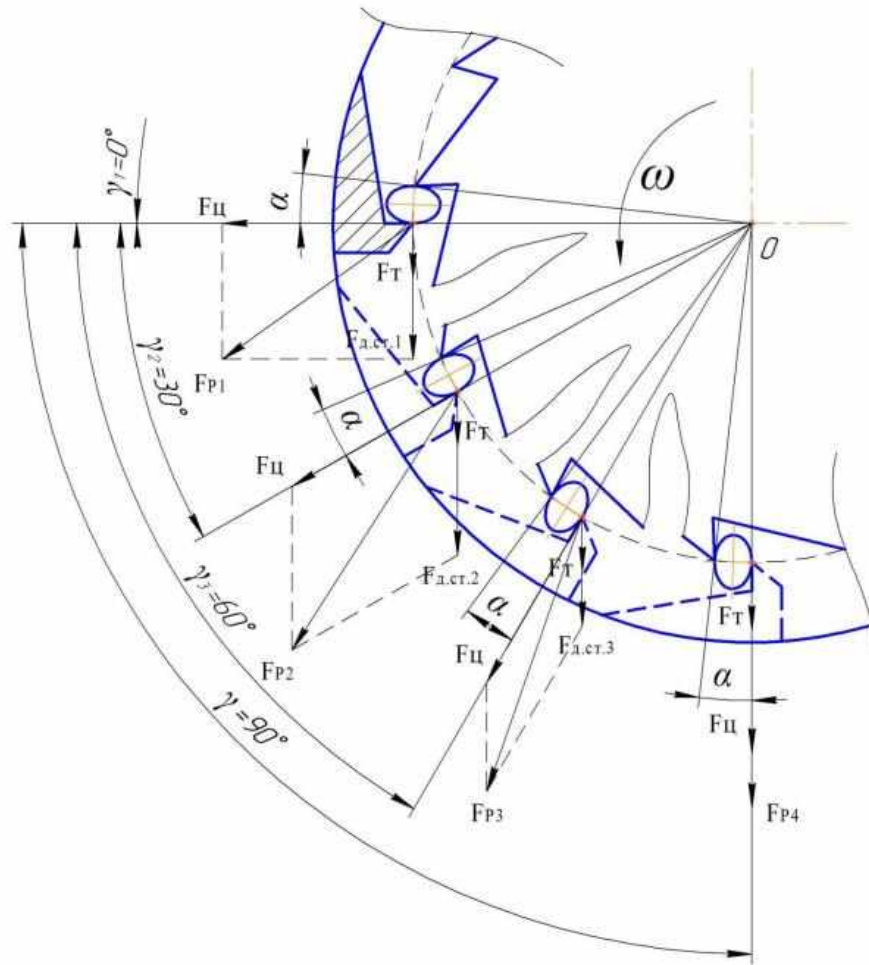


Рисунок 2.7 - Схема варіантів розташування протиріза за кутом γ .

Розподіл вихідного матеріалу, що надходить у дробарку, а також частинок уже подрібненого зерна в зазорі між ротором і статором відбувається хаотично по всьому об'єму робочої камери. З огляду на це продуктивність роторної дробарки Q визначається кількістю готового продукту, що видаляється з неї за одиницю часу:

$$Q = \Delta V \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_{зз}, \quad (2.2)$$

де ΔV – теоретично можливий об'єм подрібнюваного зерна, м³/с;

ρ - щільність матеріалу, кг/м³;

$n_{\text{п}}$ - кількість рифлів (пазів) ротора, шт.;

k_3 - коефіцієнт заповнення паза ротора;

Об'єм подрібненого зерна в реальних умовах роботи є змінною величиною, що залежить від сумарного зносу рифлів протиріза та ротора. При цьому швидкість їх зношування істотно відрізняється. Знос протиріза перевищує знос рифлів ротора у 20–38 разів (залежно від кількості рифлів і виду перероблюваної культури). Тому для інженерних розрахунків із допустимою точністю доцільно враховувати лише зношування рифля протиріза. До того ж інтенсивність зношування рифлів ротора може бути значно знижена завдяки застосуванню сучасних методів зміцнення. У цьому випадку об'єм подрібненого матеріалу визначається за залежністю:

$$\Delta V = l \cdot (h + \delta + I_{\text{пр}}) \cdot v_{\text{р}}, \quad (2.3)$$

де $v_{\text{р}}$ - лінійна швидкість ротора, м/с;

$I_{\text{пр}}$ - знос робочої кромки протиріза, м.

Згідно з [22], коефіцієнт заповнення для вальцьових і роторних дробарок знаходиться в межах 0,1–0,4.

Підставивши залежність (2.3) у вираз (2.2) з урахуванням зношування протиріза, отримаємо:

$$Q = l \cdot (h + \delta + I_{\text{пр}}) \cdot v_{\text{р}} \cdot \rho \cdot n_{\text{п}} \cdot k_3, \quad (2.4)$$

Формула продуктивності роторної дробарки, наведена в [32], враховує необхідний ступінь подрібнення:

$$Q = l \cdot \frac{D_{\text{ч}}}{\lambda} \cdot v_{\text{р}} \cdot \rho \cdot n_{\text{п}} \cdot k_3, \quad (2.5)$$

де $D_{\text{ч}}$ - початковий розмір частинки, м;

λ - необхідний ступінь подрібнення.

Використовуючи дані формул (2.4) і (2.5), отримаємо:

$$h + \delta + I_{\text{пр}} \approx \frac{D_{\text{ч}}}{\lambda} \approx M_{\text{ф}}, \quad (2.6)$$

де M_{ϕ} - комплексний показник фактичного модуля помелу, який враховує заданий модуль M та величину зносу протиріза $I_{\text{пр}}$, причому висота рифля h зменшується внаслідок зношування рифля ротора I_r .

Цей показник змінюється в такому діапазоні:

$$M_{\phi \min} \leq M_{\phi} \leq M_{\phi \max}. \quad (2.7)$$

Розглянемо окремий випадок. За умов фіксованої висоти рифля $h = 0,7$ мм, нульового робочого зазору $\delta = 0$ мм і заданого початкового модуля помелу (тонкий помел $M = 0,5 \dots 1$ мм), значення M_{ϕ} перебуватиме в інтервалі від $M_{\phi \min} = 0,5$ мм до $M_{\phi \max} = 1$ мм. У такій ситуації визначальним фактором зміни фактичного модуля помелу M_{ϕ} є лише зношування кромки протиріза $I_{\text{пр}}$. Частинки готового продукту розміром понад 1 мм (в одній із проєкцій вимірювання) слід розглядати не тільки як відхилення від норми, а й як індикатор того, що знос кромки протиріза перевищив 0,3 мм.

З урахуванням прийнятих припущень формулу продуктивності, яка враховує фактичний модуль помелу, можна записати у вигляді:

$$Q = l \cdot M_{\phi} \cdot v_p \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_3. \quad (2.8)$$

Енергія, що підводиться до приводу зернодробарок, витрачається на здійснення процесу руйнування (зрізу) зернин, подолання сил тертя між ними, а також взаємодію з робочими поверхнями машини. У зв'язку з цим споживану потужність P (Вт) можна розглядати як зусилля, необхідне для одночасного руйнування зернин, розташованих уздовж усієї довжини контакту між рифлями ротора і статора [32, 44, 56, 80]:

$$P = F_p \cdot n_z \cdot v_p \cdot k_d, \quad (2.9)$$

де n_z - кількість зернин у пазі, шт.;

k_d - динамічний коефіцієнт подрібнення в роторній дробарці, за даними [32] становить 0,4...0,66.

Результативність функціонування подрібнювального обладнання оцінюється за такими показниками, як продуктивність, питома енергоємність, матеріаломісткість і якість отриманого продукту подрібнення [32, 44, 56].

Тоді питома енергоємність роторної дробарки визначається як:

$$N_{уд} = \frac{F_p \cdot n_z \cdot v_p \cdot k_d}{l \cdot M_{ф} \cdot v_p \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_z} = \frac{F_p \cdot n_z \cdot k_d}{l \cdot M_{ф} \cdot \rho \cdot n_n \cdot k_z}. \quad (2.10)$$

Проведений теоретичний аналіз процесу подрібнення зернових матеріалів у роторній дробарці показує, що основні якісні параметри (зокрема рівномірність гранулометричного складу, модуль і ступінь подрібнення) у більшості випадків визначаються величиною зазору між рифлями ротора і протиризом статора. Із зростанням обсягів переробки значення цього зазору формується під впливом інтенсивності зношування відповідних робочих поверхонь. Швидкість зношування, у свою чергу, залежить від зносостійкості матеріалів, абразивних властивостей зернової маси, а також режимів навантаження і параметрів контакту в зоні взаємодії деталей роторної дробарки. Отримання таких залежностей можливе шляхом розроблення моделей прогнозування ресурсу та оптимізації режимів роботи дробарки на основі вибору раціональних значень зносостійкості рифлів ротора і протириза залежно від заданих умов експлуатації.

Висновки до розділу 2

У результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що роторна дробарка є складною технічною системою, ефективність і надійність якої визначаються взаємодією конструктивних елементів робочої камери, параметрами ротора та статора, а також фізико-механічними властивостями зернового матеріалу. Найбільший вплив на якість подрібнення та ресурс обладнання мають рифлені поверхні ротора і протириза статора, які безпосередньо контактують із зерною масою та зазнають інтенсивного абразивного й ударного зношування.

Теоретичний аналіз показав, що інтенсивність зношування робочих поверхонь значною мірою залежить від виду зернової сировини, концентрації мінеральних домішок, величини робочого зазору та геометричних параметрів рифлів. Встановлено, що найбільше навантаження сприймає протириз статора,

знос якого перевищує зношування рифлів ротора у десятки разів, що обумовлює необхідність підвищення його зносостійкості та оптимізації умов роботи.

На основі аналізу кінетики процесу подрібнення обґрунтовано доцільність використання рифлів трикутної форми, які забезпечують надійніше утримання зернини в зоні зрізу та стабільніші умови руйнування матеріалу порівняно з прямокутними пазами. Визначено, що геометрія рифлів, величина робочого зазору та кут падіння протиріза суттєво впливають на характер навантаження, енерговитрати та продуктивність дробарки.

У ході дослідження встановлено, що найбільш раціональним є розташування протиріза в межах кута $\gamma = 25^\circ \dots 50^\circ$, оскільки за таких умов досягається оптимальне співвідношення між ефективністю подрібнення, стабільністю процесу та інтенсивністю зношування робочих поверхонь. Переміщення зони руйнування вздовж твірної статора дозволяє знизити навантаження на кромки протиріза та створити умови для підвищення ресурсу робочих органів.

Отримані теоретичні залежності продуктивності та енергоємності роторної дробарки підтверджують, що основними факторами, які визначають ефективність її роботи, є величина зношування протиріза, модуль помелу, швидкість обертання ротора та коефіцієнт заповнення пазів. Показано, що зі збільшенням зносу робочих поверхонь зростає робочий зазор, що призводить до погіршення гранулометричного складу продукту, підвищення енерговитрат і зниження продуктивності обладнання.

Таким чином, проведений теоретичний аналіз дозволив визначити основні чинники, що впливають на надійність і довговічність роторної дробарки, а також обґрунтувати напрями підвищення її ефективності. Отримані результати є теоретичною основою для подальших експериментальних досліджень та розроблення конструктивних рішень, спрямованих на оптимізацію робочих органів і підвищення ресурсу обладнання.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма та об'єкт досліджень

Теоретичні дослідження показали, що тривалість експлуатації роторної дробарки, визначається величиною робочого зазору між ротором і статором, який, у свою чергу, залежить від інтенсивності зношування та ресурсу робочих поверхонь рифлів ротора і протиріза [23, 24].

Основною метою експериментальних досліджень є забезпечення стабільного та якісного процесу подрібнення у роторній дробарці шляхом раціонального розміщення протиріза на статорі та підвищення його зносостійкості за одночасного досягнення високих показників продуктивності.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс експериментальних досліджень, пов'язаних із випробуванням зернових матеріалів, визначенням ресурсу протиріза, виготовленого з різних конструкційних матеріалів, а також встановленням оптимальних режимів роботи до досягнення граничного зносу робочих поверхонь у межах багатofакторного експерименту.

Експериментальні дослідження виконувалися за програмою, що передбачала:

- вивчення макро- та мікротравмованості зернин, а також визначення наявності мінеральних домішок у зерні під час уточнення фізико-механічних характеристик подрібнюваних зернових матеріалів;
- проведення експериментальних досліджень інтенсивності зношування та довговічності деталей роторної дробарки;
- обробку та аналіз отриманих експериментальних результатів із подальшим їх зіставленням із теоретичними даними;
- виконання техніко-економічної оцінки, що передбачає порівняння запропонованих варіантів у різних виробничих умовах.



Рисунок 3.1 – Блок-схема експериментальних досліджень

Отже, пріоритетним завданням цього дослідження є підвищення довговічності робочих поверхонь ротора та протиріза роторних дробарок, призначених для подрібнення кормового зерна, шляхом вибору найбільш раціонального способу. За результатами проведеного експериментального аналізу визначаються оптимальні параметри геометрії робочої порожнини дробарки та режими її експлуатації.

Дослідні роботи виконувалися як у лабораторних, так і у виробничих умовах із використанням загальноприйнятих і спеціалізованих методик, на базі стандартного та спеціально сконструйованого обладнання згідно з вимогами ДСТУ та усталеними підходами до багатofакторного експериментування. Опрацювання отриманих результатів здійснювалося за допомогою ЕОМ із застосуванням програмних засобів Microsoft Excel, ZetLab, JMicrovision та інших, у середовищі яких реалізовано алгоритми математичної обробки, обчислень і статистичного аналізу.

3.2. Методика проведення експериментів

З метою уточнення фізико-механічних характеристик зернових культур у роботі були використані поширені в Україні сорти та гібриди кормового зерна, що широко застосовуються у тваринництві та комбикормовому виробництві, а саме: озима пшениця сортів «Подільська» та «Богдана», ярий ячмінь «Геліос», кукурудза гібриду «ДКС 4014», овес сорту «Скакун» і горох сорту «Мадонна». Вибір зазначених культур обумовлений їх значним поширенням у зерновиробництві України та відмінностями фізико-механічних властивостей, що впливають на процес подрібнення і характер зношування робочих органів дробарки.

Визначення вологості, геометричних і масових характеристик зерна, зокрема маси 1000 зерен, проводилося відповідно до чинних вимог державних стандартів ДСТУ ISO 712:2015 та ДСТУ 4138-2002 із використанням лабораторного обладнання кафедри агроінженерії та технічного сервісу. Для проведення досліджень використовували електронні лабораторні ваги, сушильну шафу, штангенциркуль та аналізатор вологості, які забезпечують необхідну точність вимірювань фізико-механічних параметрів зернового матеріалу.

Граничне напруження зрізу зернин τ визначалося експериментальним методом із використанням спеціалізованої установки, що включала електропривід, зрізальний механізм із тензометричним датчиком та опорну раму. Оцінювання руйнівного зусилля при зрізі зернини проводилося шляхом реєстрації максимального навантаження в момент руйнування оболонки та ендосперму зерна. Отримані результати використовувалися для оцінювання впливу фізико-механічних властивостей зернових матеріалів на енергоємність процесу подрібнення, інтенсивність зношування робочих органів та ефективність роботи роторної дробарки в цілому. Визначення вологості, геометричних і масових характеристик, зокрема абсолютної маси (маса 1000 шт. сухого насіння), досліджуваних зразків проводилося відповідно до методики, наведеної у [32], згідно з ДСТУ 13586.3-84 і 13586.5-93 [15, 16, 56] із використанням лабораторного

Комплект СПП включав набір сит із отворами \varnothing 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 мм та піддон. Просіювання матеріалу здійснювалося відповідно до загальноприйнятої методики [15, 56].

У даному дослідженні подрібнення зерна виконували за наявності одного протиріза (рифлі статора), при цьому контролювали дотримання параметрів середнього ($M = 1 \dots 2$ мм) і грубого помелів ($M = 2 \dots 3$ мм) [17, 32].

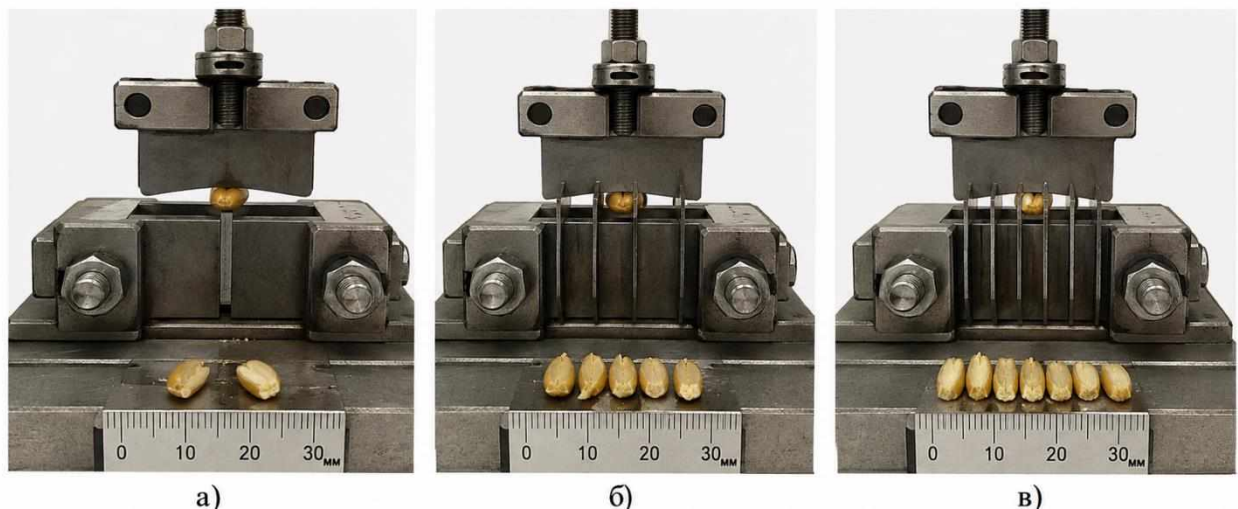


Рисунок 3.9 - Приклади поділу на установці для зрізу одиначної зернини: а) на 2 частини, б) на 3 - 5 частин, в) на 5 і більше.

Вплив зміни робочого зазору (0,5 мм, 1 мм і 1,5 мм) на чистоту зрізу або кількість частинок, на які розпадається вихідна зернина при першому зрізі, визначали на установці, показаній на рисунку 3.3 а. Зернини, що зрізаються на 2 частини (рисунок 3.9 а), вважалися початково цілими, на 3 - 5 частин (рисунок 3.9 б) - з наявністю мікротріщин і на 5 і більше (рисунок 3.9 в) - з видимими пошкодженнями оболонки або структури зернини.

Візуальний та експериментальний аналіз, зокрема визначення рівня травмованості навісок зерна масою по 2000 г, проводився для поширених в Україні зернових культур і сортів, а саме: озимої пшениці сортів «Подільська» та «Богдана», ярого ячменю сорту «Геліос», кукурудзи гібриду «ДКС 4014», гороху сорту «Мадонна» та вівса сорту «Скаун». Дослідження виконувалися в

лабораторії кафедри агроінженерії та технічного сервісу відповідно до вимог чинних нормативних документів ДСТУ 4138-2002 та ДСТУ ISO 7970:2019, що регламентують методи визначення якості та пошкодженості зерна.

Оцінювання травмованості зернового матеріалу проводилося після проходження через роторну дробарку шляхом візуального контролю та класифікації пошкоджень за характером руйнування оболонки, ендосперму та зародкової частини зернівки. Для кожного виду зерна визначали кількість частково пошкоджених, деформованих і повністю зруйнованих зернин, що дозволяло оцінити вплив конструктивних параметрів дробарки та режимів її роботи на якість подрібнення.

З метою систематизації результатів досліджень і подальшої статистичної обробки даних використовувалася таблиця обліку показників травмованості зерна (таблиця 3.1), яка заповнювалася відповідно до прийнятої класифікації видів механічного пошкодження зернівок. Отримані результати використовувалися для оцінювання ефективності роботи роторної дробарки, ступеня впливу робочих органів на зернову масу та обґрунтування напрямів удосконалення конструкції обладнання.

Таблиця 3.1 - Травмування насіння досліджуваного зерна (форма таблиці)

Вид травмування	A1 – ціле	A2 – пошкоджено незначно	B1 – пошкоджена оболонка	B2 – у зерні тріщини	B3 – у зерні скол	C1 – пошкоджений зародок	C2 – вибитий зародок	C3 – зерно знищено повністю
Досліджуване насіння, кількість у %								
I зразок								
II зразок								
Всього								

Для дослідження травмування насіння використовується прилад, що складається з: світлодіодної стрічки, яка огинає дугою чашку Петрі з краями під кутом 45° і опорами по протилежних кінцях її діаметра; мережевого адаптера для трансформування напруги зі стандартної 220 В до 12 В і окулярів з 20-кратним збільшенням. У приладі є дві черги досліджуваного насіння, взятого з різних зразків.

Послідовність проведення аналізу:

1. Приготування забарвленої води. У колбу 100 мл набирається вода, змішана з фарбою у співвідношенні 2,5...2,7/100. Розчин ретельно перемішується і настоюється протягом 2-3 хвилин.

2. Робота із зернинами. Випадковим чином відраховані 200 шт. насіння з кожної навіски засипають у забарвлену воду і залишають на 5-6 хвилин. Після цього рідина зливається, а насіння висушується на серветці або іншій вбираючій тканині до повного висихання. Далі насіння додається в одну з черг приладу.

Після цього пристрій під'єднують до електромережі та перевіряють справність функціонування світлодіодної системи. Застосовуючи окуляри з лінзою на одному оці, здійснюють огляд зернин за допомогою пінцета, підносячи їх до освітленої кромки зі світлодіодами. Кожну зернину детально досліджують з різних боків, визначають характер її пошкодження та фіксують отримані результати у таблиці 3.1.

Дослідження виконують на вибірці зі 100 зернин, після чого змінюють око для повторного контролю (використовуючи окуляри з лінзою на іншому оці). За аналогічною процедурою аналізують наступну партію зі 100 зерен. Після обробки кожної серії необхідно робити перерву для відпочинку очей тривалістю 5–10 хвилин.

3. Обробка накопичених результатів. На основі даних, занесених до таблиці, із використанням відповідної формули визначають показник Ц%:

$$Ц\% = \frac{(A1_1+A2_1)+(A1_2+A2_2)}{2}, \quad (3.1)$$

де Ц% – відсоткове значення цілісних зернин у межах однієї серії. Аналогічні розрахунки виконують для груп В і С. Зі збільшенням кількості проаналізованих зернин у вибірці підвищується точність визначення загального рівня травмування насінневого матеріалу.

З метою встановлення наявності та кількісного вмісту абразивних частинок, що надходять у робочу камеру роторної дробарки разом із мінеральними

домішками, було виконано комплекс експериментальних досліджень. Випробування проводилися в лабораторних умовах із використанням обладнання АТ Фірми «Август» (avgust crop protection). У процесі досліджень аналізували зразки озимої пшениці сортів «Подільянка» та «Богдана», ярого ячменю сорту «Геліос», вівса сорту «Скакун», гороху сорту «Мадонна», а також зерно кукурудзи гібриду «ДКС 4014» і зернові відходи кукурудзи з метою визначення вмісту мінеральних домішок у їх загальній масі. Дослідження проводилися для оцінювання впливу абразивних включень на інтенсивність зношування робочих органів роторної дробарки та характер руйнування зернового матеріалу в процесі подрібнення.

Відповідно до вимог нормативних документів 54078-2010 регламентується допустимий рівень сторонніх включень у кормовій пшениці. Згідно з державними стандартами, масова частка мінеральних домішок не повинна перевищувати 1% від загальної маси продукту [20].

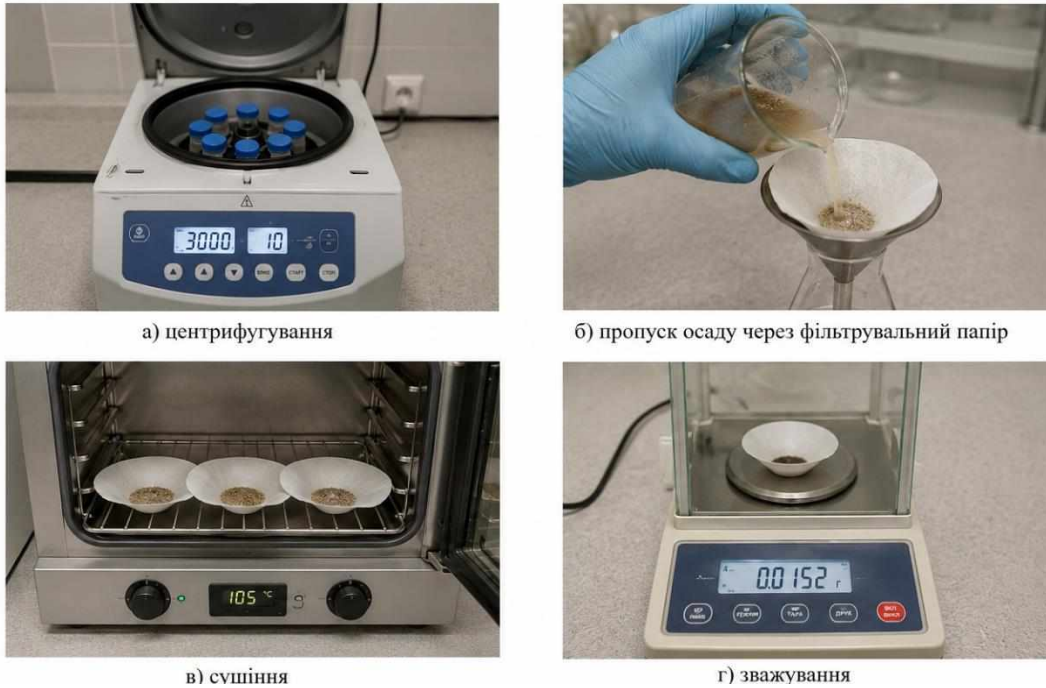
Згідно з методикою [14, 15, 16, 20], для кожного досліджуваного зразка формували навіски масою по 50 г (рисунок 3.10).



а)

б)

Рисунок 3.9 – Відбір (а) і зважування (б) вихідних навісок



а) центрифугування

б) пропуск осаду через фільтрувальний папір

в) сушіння

г) зважування

Рисунок 3.10 – Дослідження зразків зерна на наявність мінеральних домішок: а) – центрифугування, б) – пропуск осаду через фільтрувальний папір, в) – сушіння, г) – зважування

Надалі мінеральні включення відокремлювали від зернової маси шляхом промивання з подальшим центрифугуванням кожної навіски. Отриманий осад пропускали через фільтрувальний папір, після чого зразки піддавали сушінню над пальником і повторно визначали їх масу (рисунок 3.11).

За підсумками зважування визначали масу осаду на кожні 0,05 кг зразка. Відповідно до прийнятої методики, результати перерахунку вмісту мінеральних домішок у перерахунку на 1000 кг заносили до узагальненої таблиці.

3.3 Методика визначення зносу та надійності роторної дробарки

Експериментальні дослідження подрібнення різних видів зернових матеріалів виконувалися з використанням горизонтальної роторної дробарки, виготовленої в навчальній майстерні стейкхолдера кафедри підприємство «Перемога+»..

Ця дробарка застосовувалася у дисертаційній роботі аспірантів інших

закладів вищої освіти. Її габаритні розміри та початкові конструктивні параметри залишилися без змін і відповідають характеристикам, наведеним у [32] та підрозділі 1.4.2 першого розділу даного дослідження.

Конструкція роторної дробарки забезпечувала можливість:

- регулювання кута встановлення протиріза шляхом його переміщення вздовж твірної ротора з фіксацією у трьох положеннях на статорі;
- зміни робочого зазору між рифлями ротора і ріжучою кромкою (рифлею) протиріза за допомогою прокладок, встановлених між статором і протирізом;
- заміни протиріза (як зношеного на новий, так і більш міцного на менш міцний варіанти).
- заміну робочої поверхні ротора на аналогічну у випадку її зношування або механічного пошкодження;
- візуальний контроль процесів подрібнення та переміщення як вихідного, так і подрібненого зернового матеріалу в робочій камері роторної дробарки через прозору стінку корпусу, виготовлену з оргскла;
- регулювання колової швидкості ротора під час дослідження процесу подрібнення зернофуражу (шляхом зміни частоти обертання ротора асинхронного електродвигуна) із використанням перетворювача частоти серії Altivar фірми Schneider Electric;
- контроль споживаної потужності на приводному валу за допомогою вбудованої системи моніторингу параметрів перетворювача частоти Altivar.

Визначення раціональних параметрів і режимів роботи для забезпечення максимальної довговічності робочих органів здійснювали шляхом варіювання положення протиріза на статорі, а також виготовлення протиріза з різних конструкційних матеріалів.

Для проведення експериментальних досліджень із визначення напрацювання до граничного зносу протиріза було виготовлено три базові елементи довжиною 0,06 м. Кожен із них (рисунок 3.14 в) складався з чотирьох протирізів довжиною по 0,015 м, закріплених на основі у вигляді стрижня, які

виготовлялися з різних марок сталі із застосуванням технологій зміцнення або гартування. Як показано на рисунку 3.12, протирізи мали маркування на тильній стороні (номер експериментальної групи від 1 до 3) та на боковій поверхні (номер технології виготовлення від 1 до 4).



Рисунок 3.12 - Маркування протиріза

Технологічні варіанти виготовлення протиріза поділяються таким чином: варіант №1 – Ст3 (HRC 10...12), варіант №2 – Ст45 (HRC 15...17), варіант №3 – Ст45 із гартуванням (HRC 45...50), варіант №4 – Ст45 із гартуванням та нанесенням тонкоплівкового покриття ФПУ (фінішне плазмове зміцнення) із мікротвердістю 13 ГПа, що наведено на рисунку 3.13.



а) б) в) г)

Рисунок 3.13 - Виготовлені за різною технологією протирізи: а) - Ст3; б) -

Ст45; в) - Ст45 із загартуванням; г) - Ст45 із загартуванням і ФПУ

Змінні робочі поверхні ротора дослідної дробарки були виготовлені зі сталі Ст45 із гартуванням, твердістю HRC 45...50; їх діаметр становив $D = 0,1$ м, а довжина $l = 0,06$ м.

Геометричні характеристики рифлів ротора, визначені на основі результатів досліджень [32], були прийняті наступними:

- для подрібнення пшениці кількість пазів і рифлів на роторі становить 38 одиниць, при кроці $t = 8$ і висоті рифля $h = 1,2$;
- для подрібнення ячменю прийнято 32 пази і рифлі з кроком $t = 10$ та висотою рифля $h = 1,5$;
- для подрібнення вівса використано 34 пази і рифлі, з кроком $t = 13$ і висотою рифля $h = 1,4$;
- для подрібнення кукурудзи кількість пазів і рифлів становить 20 одиниць, із кроком $t = 15,5$ та висотою рифля $h = 2,4$;
- для подрібнення комбінованої кормосуміші з кількох зернових культур (універсальний ротор) прийнято 28 пазів і рифлів, із кроком $t = 11,5$ та висотою рифля $h = 1,6$.

Для всіх варіантів змінних робочих поверхонь ротора значення кута вістря встановлено $\beta = 60^\circ$, а кут нахилу стінки паза $\beta_1 = 15^\circ$ [32].

Дослідну дробарку встановлено на спільній рамі установки, що забезпечує її стійкість та функціональність. Приведення в дію здійснювалося за допомогою електродвигуна типу АІР відповідно до нормативних документів 2479 із максимальною потужністю 1,5 кВт через ремінну передачу. Потужність двигуна узгоджується з теоретично обґрунтованим значенням для процесу подрібнення $P = 460$ Вт з урахуванням коефіцієнта корисної дії та експериментальних результатів визначення критичного напруження τ при зрізі зернин [32].

Використання методу відбитка дає змогу здійснювати контроль зношування ріжучої кромки протиріза безпосередньо в процесі роботи обладнання під час планового технічного обслуговування з точністю до 1–1,5 мкм. Це, у свою чергу, дозволяє оптимізувати періодичність проведення обслуговування.

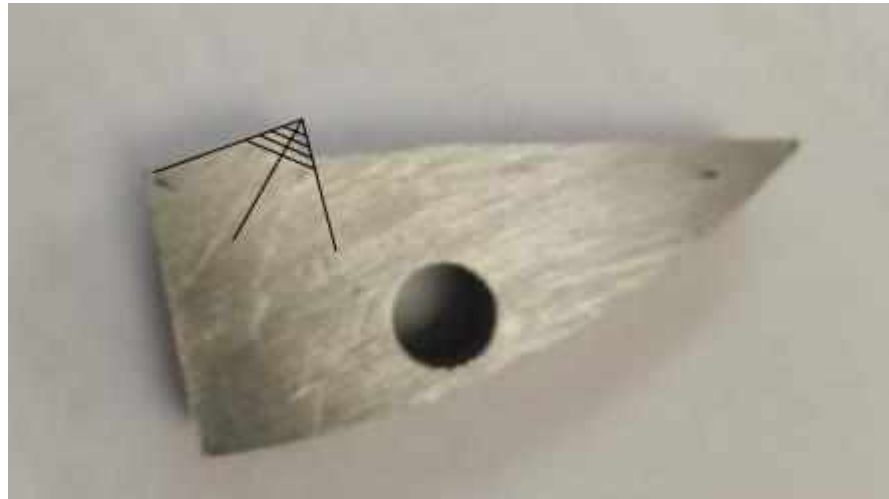


Рисунок 3.16 - Нанесення відбитка на протирізі для фіксації зносу

Згідно зі схемою, перпендикулярно до бісектриси через кожен мікрометр формуються додаткові січні лінії. Після завершення серії випробувань, що супроводжуються послідовним зняттям одного або декількох шарів товщиною 1 мкм, за утвореними перетинами визначають сумарну величину зносу за відповідний цикл експерименту.

Застосовуване обладнання (рисунок 3.17) забезпечує визначення величини зношування з високою точністю, що досягає 0,1 мкм.

Підготовка зразків протиріза виконувалась шляхом їх встановлення у шліфувально-полірувальний верстат FORCIPOL V1, де бічну поверхню доводили до необхідного стану за допомогою абразивної шкурки зернистістю 2000. Після цього проводили полірування до отримання дзеркальної поверхні, що контролювалося при мікроскопічному спостереженні. Далі, використовуючи призму твердоміра, на оброблену поверхню наносили контрольні лінії згідно з раніше описаною методикою.

подальшим збільшенням зображення у відповідному програмному забезпеченні.

3.4 Математичне моделювання роботи дробарки

За результатами узагальнення наукових джерел [21, 28, 30] та виконаного теоретичного аналізу у розділі 3 визначено три ключові фактори, що впливають на зносостійкість робочих поверхонь ротора і статора роторної дробарки: лінійна швидкість ротора v_p , концентрація мінеральних домішок у вигляді абразивних частинок $C_{абр}$, отриманих під час просіювання вихідного матеріалу, а також кут розміщення протиріза γ відносно горизонтальної осі ротора.

Взаємозв'язок і ступінь впливу цих параметрів на критерій оптимізації - швидкість зношування протирізів, виготовлених із поширених конструкційних матеріалів - характеризуються значною кількістю можливих реалізацій. Тому для організації експерименту застосовано трирівневий план другого порядку Бокса-Бенкіна для трьох факторів, який реалізовано окремо для кожного з чотирьох варіантів конструкції протиріза [12, 24]. У всіх випадках приймалося припущення про умовно незношуваний ротор, виготовлений зі Сталі 45 із загартуванням. Обраний план належить до класу майже D-оптимальних, що забезпечують рівномірний розподіл дисперсії відтворюваності результатів у всіх точках поверхні відгуку. Отримані після обробки даних рівняння регресії другого порядку мають однакові статистичні характеристики у всіх напрямках.

Під час обґрунтування факторів і вибору інтервалів їх зміни, з урахуванням рекомендацій [18, 20], передбачалося, що всі фактори є керованими, незалежними та сумісними. Межі варіювання кожного параметра визначені на основі попередніх досліджень, а також результатів власних теоретичних і експериментальних робіт і практичного досвіду експлуатації обладнання для приготування кормів.

Діапазон зміни швидкості в зоні подрібнення встановлено відповідно до оптимальних значень, отриманих при дослідженні модернізованої роторної дробарки [23]. Концентрація абразивних частинок, зумовлена наявністю

мінеральних домішок, визначена експериментально (результати наведені далі). Межі зміни кута розташування протиріза обґрунтовані теоретично і становлять 0...70°. Усі фактори процесу позначені символом X.

дослідів, у стовпцУ межах експериментального дослідження було обрано три фактори, кожен із яких варіювався на трьох рівнях: нижньому, базовому та верхньому.

З урахуванням результатів аналізу наукових робіт, присвячених функціонуванню ріжучих механізмів, як визначальні прийнято такі змінні: X1 – вміст абразивних частинок, %; X2 – лінійна швидкість, м/с; X3 – кут встановлення протиріза, градус (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Фактори і рівні їх варіювання в експерименті

Показник	Кодоване позначення	Концентрація абразиву Сабр, %	Лінійна швидкість v_p , м/с	Кут встановлення протиріза γ , °
Верхній рівень	+1	5,4	5,5	70
Основний рівень	0	2,9	5	35
Нижній рівень	-1	0,4	4,5	0
Інтервал варіювання	X	2,5	0,5	35

Кодування факторів здійснювалося за формулою:

$$X_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta X}, \quad (3.2)$$

де X_i - значення фактора;

X_0 - центр області планування;

ΔX – інтервал варіювання.

У структурі матриці планування експерименту кожен рядок відповідає окремому досліді, тоді як у стовпцях фіксуються фактори (таблиця 3.3), закодовані символами «+» і «-» із реалізацією всіх можливих комбінацій.

Таблиця 3.3 – Вихідна матриця при плануванні експерименту

Трирівневий план 2-го порядку Бокса-Бенкена			
№ дослідю	X ₁	X ₂	X ₃
1	1	1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	-1	-1	0
5	0	0	0
6	1	0	1
7	-1	0	1
8	1	0	-1
9	-1	0	-1
10	0	0	0
11	0	1	1
12	0	-1	1
13	0	1	-1
14	0	-1	-1
15	0	0	0

З метою підвищення зносостійкості протиріза раніше було запропоновано застосування чотирьох варіантів конструкційних матеріалів при його виготовленні, для кожного з яких сформовано аналогічну матрицю планування.

Опрацювання отриманих експериментальних результатів здійснювали для кожного рядка плану з урахуванням можливих поєднань рівнів факторів, використовуючи відомі залежності та загальноприйняті методики розрахунків [9, 11, 55].

Під час перевірки однорідності дисперсій для кожного варіанта за критерієм оптимізації (швидкість зношування протирізів) визначали значення критерію Кохрена за відповідною формулою:

$$G = \frac{S_{e \max}^2}{\sum_{e=1}^N S_e^2} \quad (3.3)$$

де G - критерій Кохрена;

$S_{e \max}^2$ - максимальна дисперсія в e-тій точці;

$\sum_{e=1}^N S_e^2$ - сума всіх дисперсій.

Отримані значення критерію Кохрена застосовували для підтвердження гіпотези щодо відтворюваності результатів проведених вимірювань.

Для визначення факторів, що мають найбільший вплив, а також їх взаємодій, за величинами коефіцієнтів регресії у кожному рівнянні обчислювали t-критерій Стюдента. Кожен коефіцієнт регресії порівнювали з відповідним розрахованим значенням t_i за формулою:

$$t_i = \frac{|b_i|}{s(b_i)}. \quad (3.4)$$

Після виконання цих обчислень проводили остаточну перевірку гіпотези щодо значущості коефіцієнтів регресії та формували математичну модель другого порядку. Перевірку адекватності побудованої моделі при заданому рівні значущості та визначеній кількості ступенів свободи здійснювали за допомогою наступного виразу:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s^2(Y)}, \quad (3.5)$$

де F – критерій Фішера.

Підсумковий висновок робили шляхом порівняння отриманого значення критерію Фішера з табличним.

Усі обчислення виконувалися із застосуванням математичного забезпечення, реалізованого в середовищі Microsoft Excel. За результатами обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії у кодованій формі для кожного з варіантів виготовлення протиріза, що підлягали порівнянню. Обробка результатів здійснювалася відповідно до загальноприйнятих методик [9, 11, 55].

Висновки до розділу 3

У результаті проведених досліджень було розроблено комплексну методику експериментального дослідження процесу подрібнення зернових матеріалів у роторній дробарці, яка дозволяє оцінити вплив конструктивних і технологічних параметрів на інтенсивність зношування робочих органів, ефективність подрібнення та надійність обладнання.

Обґрунтовано програму експериментальних досліджень, що включає визначення фізико-механічних характеристик зернових культур, дослідження наявності мінеральних домішок, оцінювання травмованості зерна, визначення інтенсивності зношування робочих поверхонь ротора і протиріза, а також математичне моделювання роботи роторної дробарки. Встановлено, що саме фізико-механічні властивості зернового матеріалу та концентрація абразивних включень суттєво впливають на енергоємність процесу подрібнення та довговічність робочих органів.

Для проведення експериментальних досліджень було використано спеціалізоване лабораторне обладнання, яке забезпечує необхідну точність визначення вологості, масових характеристик, граничного напруження зрізу зернин, гранулометричного складу продукту та величини зношування ріжучих елементів. Застосування тензометричної системи вимірювання та методу відбитка дозволило здійснювати контроль процесів руйнування зерна і зношування протиріза з високою точністю.

У роботі запропоновано методику оцінювання травмованості зерна після подрібнення, що дає змогу визначати характер пошкодження оболонки, ендосперму та зародкової частини зернівок. Отримані результати дозволяють оцінити вплив геометричних параметрів робочих органів та режимів роботи дробарки на якість готового продукту.

Для визначення раціональних параметрів роботи роторної дробарки використано математичне моделювання на основі трирівневого плану другого порядку Бокса–Бенкена. У якості основних факторів обрано концентрацію абразивних частинок, лінійну швидкість ротора та кут встановлення протиріза. Застосування методів математичної статистики, критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера дозволило забезпечити достовірність результатів експерименту та адекватність побудованих регресійних моделей.

Розроблена методика досліджень створює науково-практичну основу для подальшого аналізу процесів зношування робочих органів роторної дробарки, визначення раціональних режимів її роботи та обґрунтування конструктивних удосконалень, спрямованих на підвищення надійності та ресурсу обладнання.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Висновки до розділу 4

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено вплив конструктивних параметрів роторної дробарки та режимів її роботи на ефективність подрібнення зернових матеріалів, інтенсивність зношування робочих органів і надійність технологічного процесу. Визначено, що збільшення зазору між ротором і протиризом призводить до погіршення якості подрібнення, підвищення частки недоподрібнених зернин та зростання енерговитрат процесу. Експериментально підтверджено, що раціональним значенням робочого зазору є $\delta = 0 \dots 1,0$ мм, а перевищення 1,5 мм спричиняє різке зниження ефективності руйнування зерна.

Аналіз травмування зернового матеріалу показав, що характер руйнування залежить від фізико-механічних властивостей зернових культур. Найбільший рівень пошкодження зафіксовано для кукурудзи, тоді як овес і пшениця характеризувалися більш рівномірним поділом зернин. Встановлено, що підвищення швидкості ротора та зміна величини зазору істотно впливають на інтенсивність руйнування зернівок і якість готової продукції.

Дослідження вмісту мінеральних домішок у зернових матеріалах підтвердили, що наявність абразивних частинок суттєво прискорює зношування рифлів ротора та протириза. Найвищий вміст мінеральних домішок встановлено у зернових відходах і ячмені сорту «Геліос», що негативно впливає на довговічність робочих поверхонь дробарки. Отримані результати підтверджують необхідність попереднього очищення зернової маси перед подрібненням.

У ході багатофакторного експерименту отримано математичні залежності інтенсивності зношування протирізів для різних конструктивних варіантів. Встановлено, що найбільша швидкість зношування характерна для протирізів зі сталі Ст3, тоді як застосування загартованої сталі 45 і фінішно-плазмового зміцнення дозволяє знизити інтенсивність зношування у 4...4,3 рази. Найкращі результати продемонстрував варіант із використанням сталі 45 після фінішно-плазмового зміцнення.

Статистична обробка експериментальних даних показала, що показник надійності процесу подрібнення підпорядковується нормальному закону розподілу. Встановлено, що для забезпечення надійності процесу подрібнення на рівні 80...90% допустима величина зношування зуба протиріза не повинна перевищувати 1,1...1,15 мм. Перевищення цього значення призводить до порушення гранулометричного складу готового продукту та появи значної кількості недоподрібненого зерна.

Результати оцінювання довговічності елементів роторної дробарки показали, що застосування профілактичного відновлення геометрії зуба протиріза значно збільшує ресурс роботи обладнання. Для протирізів зі сталі Ст3 сумарне напрацювання становить 7,42...7,76 т, для сталі 45 – 8,55...8,95 т, для загартованої сталі 45 – 14,2...14,8 т, а для сталі 45 після фінішно-плазмового зміцнення – 35...36,1 т при забезпеченні надійності процесу на рівні 80...90%.

Проведені дослідження також підтвердили доцільність перенесення протиріза нижче горизонтальної осі ротора під кутом $\gamma = 35...45^\circ$, що дозволило зменшити вплив коефіцієнта заповнення робочої зони та підвищити фактичну продуктивність дробарки. Встановлено, що за оптимальних режимів роботи питома енергоємність процесу становить 1,58...1,66 Вт·год/кг, а фактична ефективність подрібнення перевищує 95%, що свідчить про високу якість отриманого продукту.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

Висновки до розділу 5

У результаті виконання практичної частини дослідження було розроблено комплекс конструктивних та сервісно-інженерних рішень, спрямованих на підвищення надійності, довговічності та ефективності роботи роторної зернодробарки. Основну увагу приділено оптимізації конструкції ротора, удосконаленню робочих органів та підвищенню їх зносостійкості шляхом використання сучасних матеріалів і технологій зміцнення.

Проведений аналіз показав, що найбільший вплив на ресурс дробарки мають інтенсивність абразивного зношування робочих поверхонь, динамічні навантаження та порушення балансування ротора. Для зниження негативного впливу цих факторів запропоновано використання змінних робочих елементів, локального зміцнення найбільш навантажених зон, а також удосконалення геометрії рифлів і протиріза. Застосування загартованих сталей, фінішного плазмового зміцнення та інших сучасних методів обробки поверхонь дозволяє суттєво підвищити зносостійкість деталей і забезпечити стабільність їх геометричних параметрів у процесі експлуатації.

Розроблені сервісно-інженерні рішення, що включають регламент технічного обслуговування, вібраційну діагностику та моніторинг технічного стану обладнання, забезпечують своєчасне виявлення дефектів і дозволяють реалізувати принципи обслуговування за фактичним технічним станом. Це сприяє зниженню ризику аварійних відмов, скороченню простоїв та підвищенню експлуатаційної надійності дробарки.

Практична реалізація запропонованих удосконалень дозволяє підвищити ресурс робочих органів, зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування,

а також покращити якість подрібнення зернового матеріалу. Використання систем контролю та регулювання параметрів роботи дробарки забезпечує стабільність технологічного процесу та підвищення енергоефективності обладнання.

Крім того, у роботі враховано питання охорони праці та безпечної експлуатації обладнання. Запропоновані заходи щодо зниження рівня пиловиділення, контролю вібрацій та захисту рухомих елементів сприяють покращенню умов праці персоналу та підвищенню безпеки виробництва.

Таким чином, результати проведених досліджень підтверджують ефективність запропонованих конструктивних і сервісно-інженерних рішень та їх практичну доцільність для використання у роторних зернодробарках комбікормового і зернопереробного виробництва. Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкцій дробильного обладнання та підвищення ефективності його експлуатації.

ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі магістра виконано комплексне теоретичне та експериментальне дослідження процесу подрібнення зернових матеріалів у роторній дробарці та обґрунтовано напрями підвищення її надійності, зносостійкості й ефективності експлуатації. Проведений аналіз сучасного стану подрібнювального обладнання показав, що основними причинами зниження продуктивності та довговічності роторних дробарок є інтенсивне абразивне зношування робочих поверхонь, підвищені динамічні навантаження, дисбаланс ротора, а також негативний вплив мінеральних домішок у зерновій масі.

У першому розділі виконано аналіз існуючих конструкцій подрібнювальних машин та особливостей їх роботи. Встановлено, що найбільший вплив на надійність роторної дробарки мають робочі поверхні ротора та протиріза, які безпосередньо контактують із зерною масою і зазнають інтенсивного зношування. Доведено необхідність удосконалення конструктивних елементів дробарки, оптимізації геометрії рифлів і застосування сучасних зносостійких матеріалів та технологій зміцнення.

У другому розділі розглянуто теоретичні положення процесу подрібнення зерна та досліджено динаміку роботи ротора роторної дробарки. Встановлено, що величина робочого зазору між ротором і протирізом є одним із визначальних параметрів, які впливають на ефективність руйнування зерна, енерговитрати та інтенсивність зношування робочих поверхонь. Теоретично обґрунтовано доцільність використання рифлів трикутної форми та розміщення протиріза під кутом $\gamma = 35 \dots 45^\circ$, що забезпечує покращення умов захоплення і зрізу зерна.

У третьому розділі розроблено методику проведення експериментальних досліджень, визначено програму випробувань та описано лабораторне обладнання. Дослідження виконувалися для поширених в Україні зернових культур: озимої пшениці сортів «Подільська» та «Богдана», ярого ячменю «Геліос», кукурудзи гібриду «ДКС 4014», вівса сорту «Скакун» і гороху сорту «Мадонна». Запропонована методика дозволила оцінити фізико-механічні властивості зерна,

інтенсивність зношування робочих органів, гранулометричний склад готового продукту та вплив мінеральних домішок на роботу дробарки.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень. Встановлено, що збільшення робочого зазору між ротором і протиризом понад 1,5 мм призводить до різкого зниження ефективності подрібнення, збільшення частки недоподрібнених зернин та підвищення енерговитрат процесу. Визначено, що оптимальні значення зазору становлять 0...1,0 мм. Дослідження показали, що наявність мінеральних домішок у зерновій масі суттєво прискорює абразивне зношування робочих поверхонь ротора та протириза. Найбільший вміст абразивних частинок зафіксовано у зернових відходах та ячмені сорту «Геліос».

Експериментально підтверджено, що використання загартованої сталі 45 та технологій фінішно-плазмового зміцнення дозволяє суттєво підвищити зносостійкість робочих органів роторної дробарки. Встановлено, що застосування фінішно-плазмового зміцнення забезпечує збільшення ресурсу протириза у декілька разів порівняно зі сталлю Ст3 та звичайною сталлю 45. Отримані результати підтвердили доцільність використання сучасних методів локального зміцнення робочих поверхонь для підвищення довговічності обладнання.

У п'ятому розділі запропоновано практичні заходи щодо підвищення ефективності та надійності роботи роторної дробарки. Розроблено регламент технічного обслуговування, який включає контроль стану кріплень, моніторинг рівня вібрацій, очищення робочої камери, контроль ступеня зношування робочих органів і періодичне балансування ротора. Обґрунтовано доцільність використання систем вібраційної діагностики та моніторингу технічного стану обладнання в режимі реального часу. Впровадження принципів predictive maintenance дозволяє своєчасно прогнозувати розвиток дефектів, зменшити витрати на ремонт і підвищити надійність роботи дробарки.

Окрему увагу приділено питанням охорони праці та екологічності виробництва. Встановлено, що використання аспіраційних систем, герметизації робочої камери та систем пиловловлювання дозволяє суттєво знизити концентрацію зернового пилу у виробничих приміщеннях, покращити санітарно-гігієнічні умови

праці та зменшити ризик утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей. Запропоновані технічні рішення також сприяють зменшенню шуму, вібрацій і енергоспоживання роторної дробарки.

У результаті виконаних досліджень досягнуто поставленої мети роботи — підвищення надійності та збільшення терміну експлуатації роторної зернодробарки шляхом оптимізації конструктивних елементів, вибору раціональних режимів роботи та впровадження сучасних сервісно-інженерних рішень. Отримані результати мають практичне значення для підприємств агропромислового комплексу та можуть бути використані при модернізації існуючого дробарного обладнання й розробленні нових конструкцій роторних дробарок.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бойко І. Г. Машини та обладнання для подрібнення зернових матеріалів : підручник. Київ : Вища школа, 2016. 412 с.
2. Василенко П. М. Машини та обладнання агропромислового виробництва. Київ : Урожай, 2014. 486 с.
3. Гуменюк М. П., Савченко П. І. Технологія відновлення та зміцнення деталей машин. Львів : Новий Світ, 2017. 384 с.
4. Іванченко О. С., Мельник П. В. Машини та обладнання для подрібнення сировини в аграрному виробництві. Харків : Факт, 2019. 372 с.
5. Коваленко В. Г. Конструкції та експлуатація зернодробарок : монографія. Київ : Аграрна освіта, 2018. 295 с.
6. Кравченко С. В., Бойко І. Г. Матеріалознавство і термічна обробка конструкційних матеріалів. Дніпро : Середняк Т. К., 2021. 305 с.
7. Лисенко О. М. Основи наукових досліджень в інженерії : навчальний посібник. Київ : НУБіП України, 2020. 248 с.
8. Міщенко В. О. Методи діагностики технічного стану машин // Вісник аграрної науки. 2019. № 6. С. 48–55.
9. Нормативи технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Київ : Мінагрополітики України, 2018. 84 с.
10. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві. Київ : Держпраці, 2020. 96 с.
11. Петренко А. В. Методи підвищення зносостійкості деталей машин. Харків : ХНТУСГ, 2018. 224 с.
12. Погорілий Л. В. Механізація технологічних процесів у агропромисловому виробництві. Київ : Урожай, 2015. 365 с.
13. Сидоренко В. П., Ковальчук І. М. Технологічні процеси подрібнення зернової сировини та обладнання для її переробки. Київ : Вища школа, 2020. 410 с.
14. Тарасенко Є. Г. Теоретичні основи процесів подрібнення сипких матеріалів. Київ : НУБіП України, 2020. 243 с.

15. Технічний сервіс машин в агропромисловому комплексі / за ред. П. І. Савченка. Київ : Аграрна освіта, 2019. 340 с.
16. Хоменко В. С. Технології зміцнення та відновлення деталей машин. Дніпро : Нова ідея, 2017. 218 с.
17. Шевченко О. П. Вібраційна діагностика машин та обладнання : навчальний посібник. Харків : Факт, 2021. 275 с.
18. Шарапа М. Г. Основи проектування машин для подрібнення матеріалів. Київ : Агроосвіта, 2018. 287 с.
19. ASTM G65-16. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken : ASTM International, 2016. 18 p.
20. ISO 10816-3:2009. Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts. Geneva : ISO, 2009. 34 p.
21. Budynas R., Nisbett J. Shigley's Mechanical Engineering Design. New York : McGraw-Hill Education, 2015. 1104 p.
22. Hutchings I., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 408 p.
23. Totten G. Handbook of Mechanical Alloy Design. New York : CRC Press, 2018. 720 p.
24. ASM International. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. Ohio : ASM International, 2017. 529 p.
25. Bhadeshia H., Honeycombe R. Steels: Microstructure and Properties. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 420 p.
26. GEAPS. Grain Processing and Equipment Handbook. USA, 2018. 160 p.
27. FAO. Grain Processing Technologies and Equipment. Rome, 2017. 218 p.
28. KMZ Industries. Grain Processing Equipment Catalogue. Karlivka, 2022. 88 p.
29. SKF. Bearing Failures and Maintenance Guide. Sweden, 2020. 112 p.
30. Sandvik Coromant. Wear Resistance and Surface Hardening Technologies. Sweden, 2021. 95 p.
31. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials. New York : John Wiley & Sons, 1995. 336 p.

32. Stachowiak G., Batchelor A. *Engineering Tribology*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2014. 884 p.
33. Hutchings I., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 408 p.
34. Totten G. *Surface Modification and Mechanisms: Friction, Wear and Lubrication*. New York : CRC Press, 2018. 652 p.
35. Holmberg K., Erdemir A. Influence of Tribology on Global Energy Consumption, Costs and Emissions // *Friction*. 2017. Vol. 5. No. 3. P. 263–284.
36. ASM International. *Surface Engineering for Wear Resistance*. Materials Park : ASM International, 2017. 529 p.
37. Bhadeshia H., Honeycombe R. *Steels: Microstructure and Properties*. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 420 p.
38. Budynas R., Nisbett J. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York : McGraw-Hill Education, 2015. 1104 p.
39. Popov V. *Contact Mechanics and Friction*. Berlin : Springer, 2017. 398 p.
40. Bowden F., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford : Oxford University Press, 2001. 424 p.
41. *Tribology Handbook* / edited by M. Neale. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1995. 928 p.
42. Myshkin N., Petrokovets M. *Tribology: Principles and Applications*. Gomel : IMMS NAS Belarus, 2002. 312 p.
43. ASTM G99-17. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM International, 2017. 12 p.
44. ISO 7148-2:2012. *Plain Bearings — Testing of Bearing Materials*. Geneva : ISO, 2012. 28 p.
45. SKF. *Rolling Bearings Catalogue*. Gothenburg : SKF Group, 2020. 2040 p.
46. Sandvik Coromant. *Surface Hardening and Wear Resistance Technologies*. Sweden, 2021. 95 p.
47. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. London : SAGE Publications.